



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

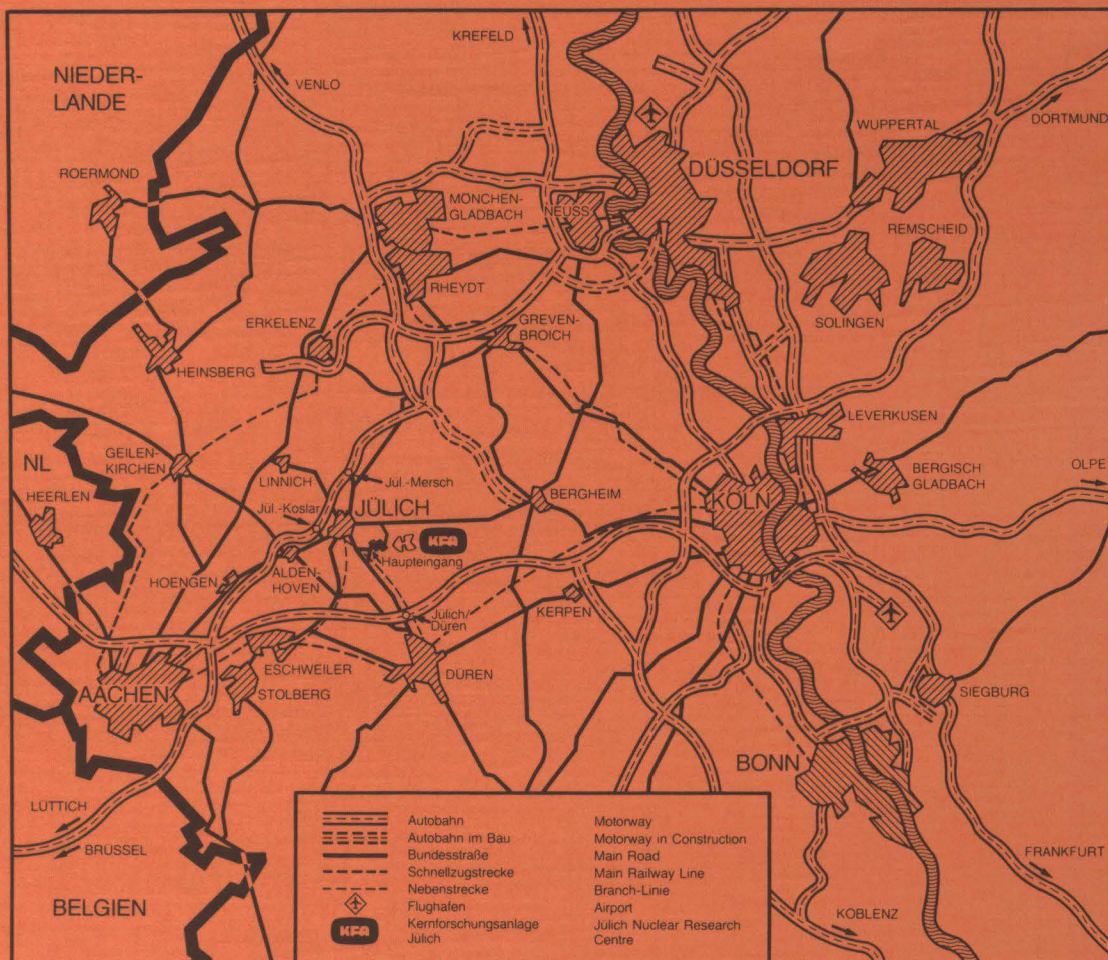
Institut für Reaktorentwicklung

**Saurer Regen,
Schwermetalle und die Aufnahme
der Schadstoffe durch die Pflanzen**

von

Ashu T. Bhattacharyya

Jül - Spez - 265
August 1984
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 265
 Institut für Reaktorentwicklung Jül-Spez-265

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 19 13 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833 556-0 kf d

**Saurer Regen,
Schwermetalle und die Aufnahme
der Schadstoffe durch die Pflanzen**

von

Ashu T. Bhattacharyya

Saurer Regen, Schwermetalle und die Aufnahme
der Schadstoffe durch die Pflanzen

von

Ashu T. Bhattacharyya

KURZFASSUNG

Dieser Bericht ist eine Literaturstudie über den sauren Regen. Der saure Regen, dessen pH-Wert in der Bundesrepublik Deutschland durchschnittlich bei 4.1 liegt, löst Schwermetalle. Diese werden dann durch die Bodenlösung mit Hilfe der Wurzelhaare von den Pflanzen aufgenommen. Die sauren Komponenten sowie die Schwermetalle zerstören dann die Pflanzen. Dieser Bericht beschreibt diese Vorgänge in drei Kapiteln - der saure Regen, die Schwermetalle sowie die Aufnahme der Schadstoffe durch die Pflanzen. Anschließend wird dargestellt, wie die Wirkung dieser Schadstoffe einen gesunden Baum zum Sterben bringen.

Vorwort

Dieser Bericht ist eine Literaturstudie.
Der Inhalt dieses Berichtes war der
Doktor-Vortrag, der am 8.3.1984 in der
Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-
Westfälischen Technischen Hochschule,
Aachen vom Verfasser gehalten wurde.
Der Verfasser dankt allen Kolleginnen und
Kollegen, die bei der Beschaffung der
Literaturen und bei der Durchsicht des
Manuskriptes sowie mit konstruktiven Vor-
schlägen geholfen haben.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
	Vorwort	2
1	Allgemeines	4
2	Ursache des sauren Regens	4
2.1	Die Schadstoffproduktion	5
2.2	Emission, Immission, Deposition und deren Meßwerte	7
2.3	Der saure Regen	9
2.3.1	Die Schwermetalle	19
3	Der Boden, der saure Regen und der Aufnahmemechanismus der Schadstoffe durch die Pflanzenwurzeln	32
3.1	Die Pflanzenwurzeln	34
3.2	Die Nähr- und Schadstoffaufnahmen und deren Transporte	38
3.2.1	Aufnahme der Nährionen	38
3.2.2	Transport der Nährionen in die Pflanze	41
4	Auswirkung der durch die Pflanzenwurzel aufgenommenen Schadstoffe	43
5	Der Tod eines Baumes	45
6	Literaturverzeichnis	50

1. Allgemeines

Obwohl das Thema sich auf den sauren Regen und die Aufnahme der Schadstoffe durch die Pflanzenwurzeln konzentriert, muß man das Problem im Gesamtzusammenhang der Ökotoxikologie des Ökosystems betrachten. Dabei kommen Fragen auf wie:

Was ist saurer Regen?

Wie entsteht er?

Welcher Zusammenhang besteht zwischen Waldsterben und dem sauren Regen?

Was sind Schwermetalle und wie hängen sie mit dem sauren Regen zusammen?

Viele der Fragen, die in diesem Zusammenhang gestellt werden, können noch nicht beantwortet werden, denn der Komplex des sauren Regens ist noch nicht erschöpfend erforscht. Im folgenden wird der Versuch gemacht, die Fakten und Untersuchungsergebnisse, die man in der Hand hat, geordnet darzustellen. So ist das Thema in mehrere Teile eingruppiert worden. Diese sind

- die Ursache des sauren Regens,
- die Schadstoffe,
- der Boden, die Pflanzen und die Aufnahme der Schadstoffe durch die Pflanzenwurzel,
- sowie die Auswirkung der Schadstoffe auf die Pflanzen

2. Die Ursache des sauren Regens

Die Ursache des sauren Regens (eigentlich Niederschlag) ist anthropogen. Das bedeutet, daß die Schadstoffe, die den sauren Regen verursachen, von Menschen durch die Industrie, durch die Autos sowie durch die Haushalte produziert werden.

Die Schadstoffe, die den sauren Regen bilden, sind Schwefeldioxid, Stickoxid sowie Chlorid. Daneben sind als gefährliche toxische Stoffe, die der saure Regen mit sich führt, die Schwermetalle zu nennen. Wenn das Regenwasser sauer wird, lösen sich diese Schwermetalle, je nach dem Grad der Säure, mehr oder weniger in dem Regenwasser (saurer Niederschlag), das auf den Boden gelangt und versickert. Dabei werden diese Schadstoffe

zusammen mit Wasser zu den Pflanzenwurzeln transportiert und wirken somit auf das Ökosystem ein.

2.1 Die Schadstoffproduktion

Untersucht man die Quellen der relevanten Schadstoffe, so stellt man fest, daß im wesentlichen drei Gruppen den Hauptanteil dieser Schadstoffe erzeugen.

Gruppe 1: Die Kraftwerke: Zu dieser Gruppe gehören Kohle-, Öl- und Gaskraftwerke sowie die Müllverbrennungsanlagen. Hierzu gehören aber auch die Kesselanlagen der Industrie.

Gruppe 2: Die Industrie: Zu dieser Gruppe kommen die chemischen sowie die metallverarbeitenden Industrien wie Kraftfahrzeugbau und Kleinverbraucher

Gruppe 3: Die Haushalte und der Verkehr: In den Haushalten werden die Schadstoffe bei den Verbrennungsprozessen produziert, auch die Landwirtschaft trägt z.B. durch Düngung (Klärschlamm) zur Schadstoffproduktion bei. Ferner trägt der Verkehr mit seinem Schadstoffausstoß wesentlich zur Schadstoffproduktion bei.

Mit zunehmendem Energieverbrauch steigen naturgemäß auch die Emissionen. Hierbei ist zu beachten, daß die Wahl der eingesetzten Energieträger Auswirkungen auf die Höhe der Emissionen hat. So hat die Verdrängung der Kohle durch das Erdgas (und teilweise Öl) eine Reduktion des Schwefeldioxids zur Folge. Auch die Erhöhung des Wirkungsgrades (z.B. durch die höhere Verbrennungstemperatur) bewirkt eine relative Minderung von Schwefeldioxid, kann jedoch auch eine Erhöhung von Stickoxid zur Folge haben. Die Abb.1 verdeutlicht diese Entwicklung. Analysiert man diese Abbildung, so stellt man fest, daß die Staubbelastung von 1966 bis zum Jahre 1978 sich von 100 % auf etwa 30% verringert hat. Dieser Rückgang hängt mit Sicherheit damit zusammen, daß heute verbesserte Entstaubungsanlagen eingesetzt werden. Auch immer weniger Haushalte verwenden Kohle als Brennstoff.

Die verbesserten Verbrennungstechniken und der Übergang zu schwefelarmen Brennstoffen haben dazu geführt, daß die SO_2 -

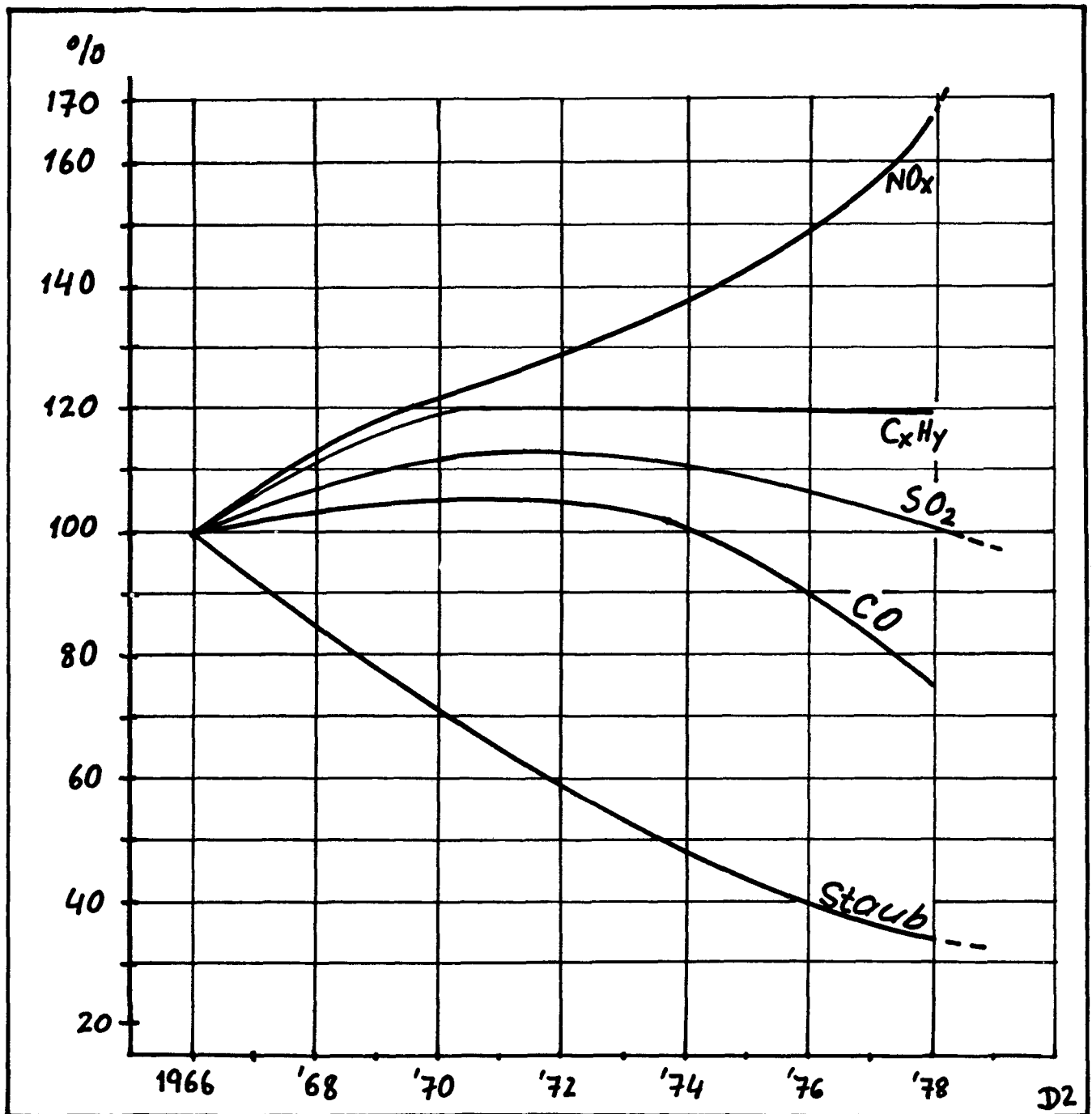


Abb.1: Schadstoffemission und deren Anteil [1]

Produktion zwischen 1966 und 1978 nahezu unverändert geblieben ist. Hierzu tragen auch die vielen Haushalte bei, die zunehmend nicht mehr Kohle als Hausbrand nehmen und stattdessen Öl- oder Gas verwenden. Auch die Fernheiznetze haben zur Minderung der Emissionen geführt.

Die Stickoxidemission dagegen ist zwischen 1966 und 1978 auf 167% gestiegen. Der Grund dafür ist, daß zum einen der Brennstoffverbrauch angestiegen ist und daß zum anderen in dieser Zeitspanne der Kraftfahrzeugverkehr gewaltig angestiegen ist. Zu dem kommt hinzu, daß die Großfeueranlagen durch die Verbesserung von Wirkungsgraden höhere Temperaturen in der Brennkammer erreichen und somit zum Teil höhere Stickoxidemengen produzieren. Die Kohlenmonoxidemission ist in der Zeitspanne um 25% zurückgegangen. Mit dem Rückgang des Kohleverbrauchs in den Haushalten ging auch der Kohlenmonoxidgehalt der Luft zurück. Insbesondere hat die bessere Kraftstoffverbrennung die CO-Erzeugung in den Kraftfahrzeugen vermindert jedoch indirekt auch eine Steigerung des NO-Ausstoßes bewirkt. Die Kohlenwasserstoffemission ist in den Jahren zwischen 1966 und 1978 unverändert geblieben, da einerseits keine neuen petrochemischen Anlagen mehr gebaut worden sind, auf der anderen Seite die Kohlenwasserstoffe in Autos besser verbrannt werden.

2.2 Emission, Immission, Deposition und deren Meßwerte

Emission, Immission sowie Deposition sind die Begriffe, die in Zusammenhang mit dem sauren Regen verwendet werden.

Die anthropogene Emission ist der Ausstoß der Schadstoffe von einer Anlage (Fabrik, Autos etc.) in die Umwelt.

Die natürlichen Emissionen entstehen durch natürliche Quellen wie Vulkane usw.

Die Immission ist die Einwirkung der Schadstoffe auf die Umwelt. Die Immission der Luft ist die Verunreinigung der Luft, die in der Atemhöhe des Menschen gemessen wird.

Die Deposition ist die Menge der anfallenden Schadstoffe auf dem Boden. Bei der trockenen Deposition wird ein Teil der in der Luft befindlichen Schadstoffe von den Staubpartikeln adsorbiert, diese fallen auf den Boden und auf die Blätter. Der grö-

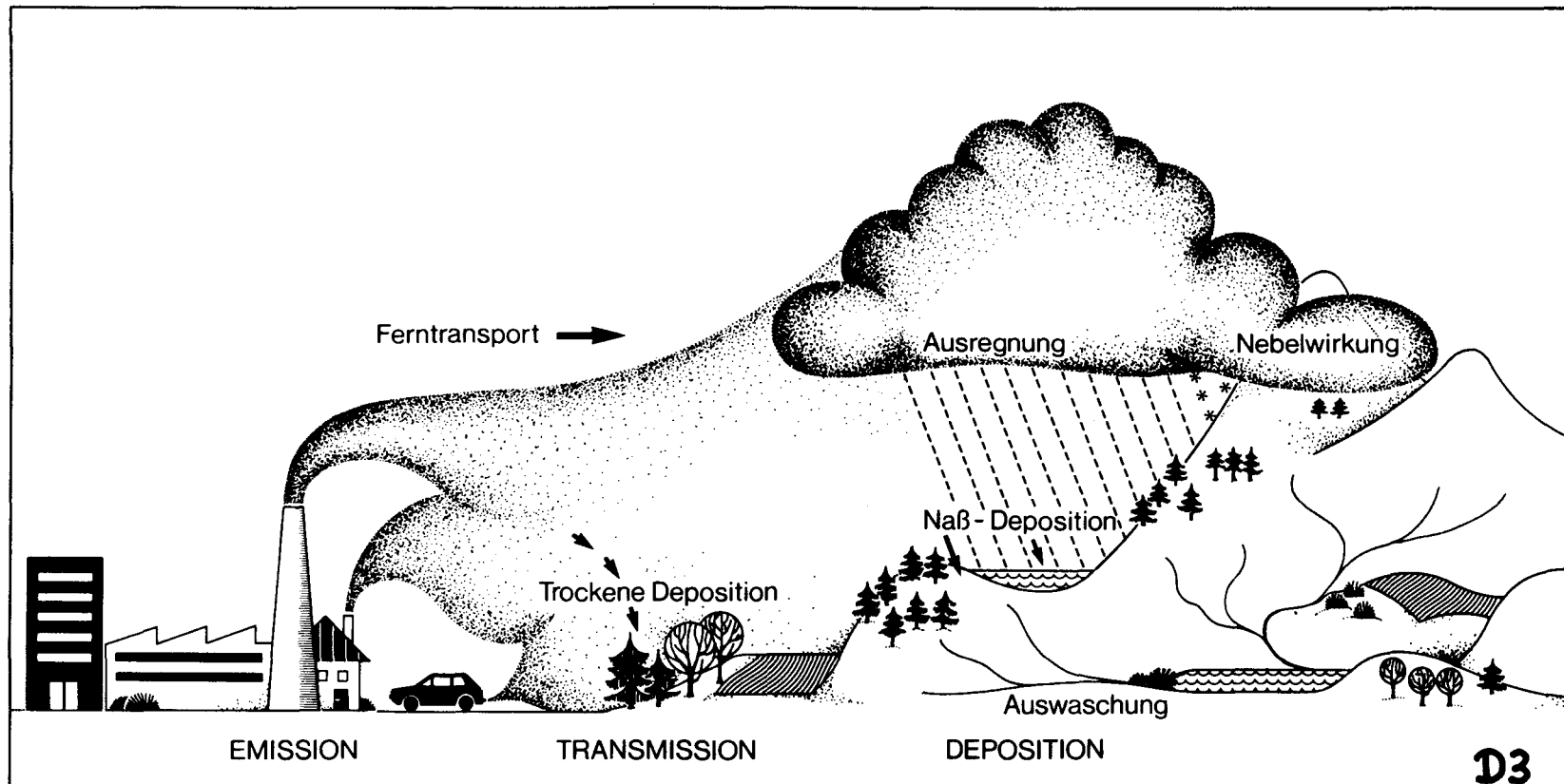


Abb.2: Räumliche Trennung von Emission, Transmission und Deposition atmosphärischer Schadstoffe [3]

Bere Teil der Schadstoffe wird jedoch sehr weit transportiert (größere Flächendeckung) und fällt dann durch den Regen als die nasse Deposition auf den Boden. Die Abb.2 stellt diese Vorgänge bildlich dar.

In der Bundesrepublik Deutschland werden an mehreren Stellen die Immissionsmengen gemessen. Eine umfangreiche Untersuchung ist vom Umweltbundesamt, Berlin in Zusammenarbeit mit der Kernforschungsanlage, Jülich (ICH) durchgeführt worden. Dabei sind zwölf Meßstellen zwischen Schleswig in Norddeutschland und Hohem Peissenberg in Bayern eingerichtet worden. Diese Meßstellen sind in der Abb.3 in dem Bild der Bundesrepublik Deutschland eingetragen.

2.3 Saurer Regen

Das Schwefeldioxid SO_2 oxidiert zu Schwefeltrioxid SO_3 und bildet mit Wasser Schwefelsäure. Die Umwandlung des Stickstoffes zum Stickoxid NO und die Oxidation des NO in NO_2 beginnt bereits in der Brennkammer der Feuerungsanlagen und der Autos sowie der Flugzeuge. Beim Steigen der Verbrennungstemperatur beschleunigt sich die thermische NO_2 -Bildung. Mit dem Wasser bildet NO_2 dann die Salpetersäure HNO_3 . Neben der Schwefelsäure und der Salpetersäure bildet die Salzsäure eine weitere Komponente des sauren Regens. Das Chlorid kommt naturgegeben in Küstennähe und -anthropogen bedingt- in der Nähe der Salzbergwerke vor. Das Chlorid bildet mit Wasser Salzsäure. Unter Saurem Regen versteht man zunächst die nasse Deposition von H_2SO_4 , HNO_3 und HCl , weil diese Stoffe das Regenwasser ansäuern. Der saure Regen transportiert auch die trockene Deposition in den Boden hinein. Er trägt auch zur Einbringung der Schwermetalle in das Ökosystem bei. Bei der Bildung des sauren Niederschlags spielen die Niederschlagsmengen eine wichtige Rolle. Bei starkem Niederschlag wird die Säurekonzentration im Boden geringer (Auswaschung und Verdünnungseffekt) als bei schwachem Niederschlag. Die Tabelle 1 zeigt die mittlere jährliche Niederschlagsmenge/2/ im Zeitraum September 1979 bis August 1981. Die in den Meßstellen gemessenen Immissionen Sulphat - Schwefel, Nitrat - Stickstoff und Chlorid sind in der Abb. 4 dargestellt.



Abb.3 Meßstellen des Umweltbundesamtes [2]

TABELLE 1: Mittlere jährliche Niederschlagsmenge im Zeitraum September 1979 bis August 1981/2/

Meßstellen	in mm Jahr ⁻¹	in % des langjährigen Mittels der Nieder- schlagsmenge
Schleswig (1)	1091	133.2
Hamburg (2)	1011	135.3
Braunschweig (4)	745	116.2
Essen (6)	1018	122.8
Jülich (7)	735	114.7
Deuselbach (8)	914	107.8
Kleiner Feldberg (9)	1192	124.3
Frankfurt/Main	752	111.0
Hof (10)	811	119.8
Hoher Peißenberg (12)	1201	99.1

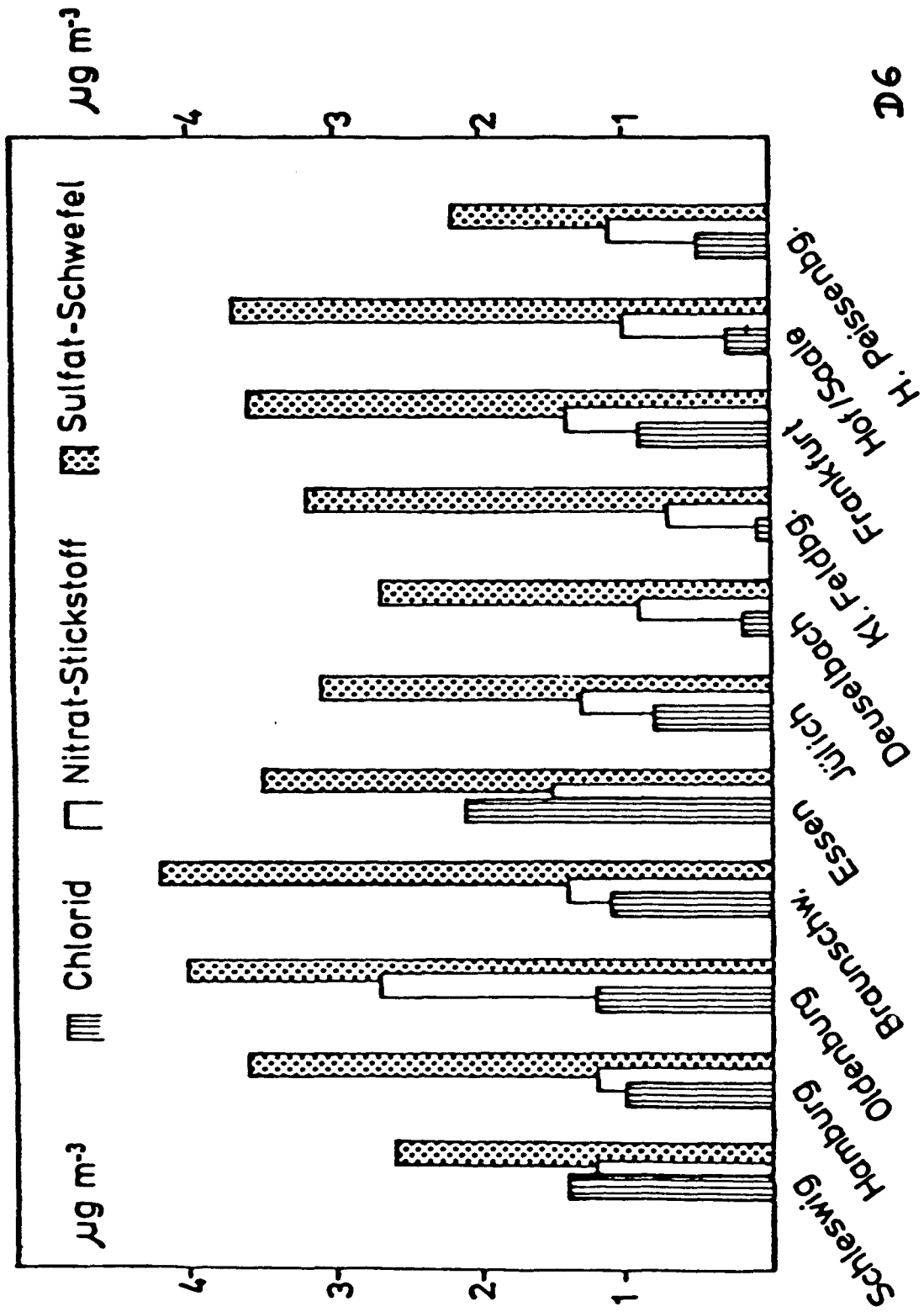


Abb.4: Mittlere Immissionen an den Meßstellen [2]

In diesem Bild erkennt man sehr unterschiedlich säurebildende SO_4^{2-} , NO_3^- und Cl^- -Konzentrationen an verschiedenen Meßstellen. Die höchsten Sulphatkonzentrationen liegen in Braunschweig und Oldenburg. Es ist zu erwähnen, daß in den Ballungsräumen wie Hamburg, Frankfurt und Essen dieser Wert von etwa $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über dem von Schleswig liegt. Möglicherweise verursachen die anthropogenen Quellen solche hohen Sulphatkonzentrationen, denn der Sulphat-Schwefelwert liegt bei den restlichen Meßstellen in dünn besiedelten Gebieten zwischen 2.7 und $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Nitratstickstoffkonzentration zeigt ein ähnlich interessantes Bild. Diese liegen zwischen 1.5 und $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Konzentrationen des Chlorides fallen vom Norden nach dem Süden Deutschlands hin ab. Die erhöhten Werte im Norden deuten auf die Seesalzpräsenz hin. Die Werte liegen zwischen $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Norden und etwa $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Süden. In den Ballungsgebieten Essen und Frankfurt liegen diese Werte zwischen 2.1 und $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und deuten auf die anthropogenen Chloridquellen hin. Das Gesamtbild zeigt deutlich, daß in den Ballungsgebieten die Konzentrationen von SO_4^{2-} und NO_3^- hoch sind. Außerhalb der Einzugsgebiete von Ballungsräumen z.B. Hoher Peissenberg sind die Konzentrationen von SO_4^{2-} und NO_3^- deutlich niedriger.

Auf Grund der weiten Transportentfernungen von teilweise mehreren 100 km liegt es nahe, daß die Immission im Lande nicht allein durch die inländische Emission erklärt werden kann. Dies wird deutlich, wenn man die intereuropäische Säureniederschlagsbildung durch Schwefeldioxid (SO_4^{2-} - Deposition), die in der Abb.5 veranschaulicht wird, analysiert. Die Abb.5 zeigt nicht nur die in einem Lande anfallenden Schwefelmengen in Form von SO_4^{2-} , sondern zeigt auch in Zahlen, wieviel Prozent des im jeweiligen Land niedergehenden Schwefels als saurer Regen vom Ausland verursacht wird./4/ In der Tab.2 sind die Immissionsdaten der Länder Europas aus der Abb.5 analysiert.

Bevor die Analyse dargestellt wird, muß man einige Zahlen bezüglich des intereuropäischen sauren Regens erwähnen. Zählt man die Gesamtschwefelmengen der in der Abb.5 eingetragenen Länder zusammen, so kann festgestellt werden, daß 10.76 Millionen Tonnen Schwefel als Deposition in Europa im Jahre 1978 errechnet wurden. Wenn man Stickoxid ($\sim 30\%$) und Chlorid ($\sim 10\%$)



D61

Abb. 5 : Grenzüberschreitender Schwefeltransport |4|

Tabelle 2: Niederschlag von Schwefel und Gesamtd deposition
durch sauren Regen in 1978 in verschiedenen Länder/4,5/

Länder	aus Eigen- produktion		aus Fremd- produktion		ΣS 10 ³ Tonnen	Anteile		Konzentration Kg Kopf. a		Konzentration von S [kg/(km ² .a)]						Gesamtdeposition des sauren Regens in Kg/(km ² .a)		
	%	10 ³ Tonnen	%	10 ³ Tonnen		%	Stelle	Kopf. a	Stelle	Inland	PL	Ausland	PL	Summe	PL			
Norwegen	16	8.96	84	47.04	56	0.52	16	13.69	15	27.66	16	143.9	15	171.65	16	286.08		
Schweden	33	52.47	67	106.53	159	1.48	12	19.097	12	116.61	15	236.75	14	353.36	14	588.93		
Dänemark	35	42	65	78	120	1.15	15	23.53	8	975.07	11	1810.84	9	2785.91	12	4643.18		
GB	92	809.6	8	70.4	880	8.18	7	15.75	13	3316.63	3	288.4	13	3605.03	10	6008.38		
NL	24	48.96	76	155.04	204	1.9	11	14.37	14	1442.63	10	4568.33	3	6010.96	5	10018.27		
DDR	48	472.12	42	341.88	814	7.57	8	42.84	3	4364.29	1	3160.35	4	7524.64	2	12541.1		
Polen	47	663.64	53	748.36	1412	13.12	3	39.69	5	2122.41	7	2393.35	8	4515.76	6	7526.27		
Belgien	25	52.25	75	156.75	209	1.94	10	21.2	10	1712.38	8	5137.32	1	6849.7	3	11415.01		
Bundesrepubl. Deutschland	49	741.86	51	772.14	1514	14.07	1	24.53	7	2983.06	5	3104.82	6	6087.88	4	10146.47		
ČSSR	41	448.95	59	646.06	1095	10.18	5	71.57	1	3511.02	2	5052.44	2	8563.46	1	14272.43		
Österreich	18	57.24	82	260.76	318	2.96	9	42.07	4	682.62	12	3109.72	5	3792.34	8	6320.57		
Frankreich	55	817.85	45	669.15	1487	13.82	2	27.8	6	1495.08	9	1223.23	11	2718.33	13	4530.55		
Schweiz	12	16.68	88	122.32	139	1.29	13	21.84	9	403.94	13	2962.23	7	3366.17	11	5610.28		
Spanien	54	74.52	46	63.48	138	1.28	14	3.67	16	147.63	14	125.76	16	273.39	15	455.65		
Italien	83	938.73	17	192.27	1131	10.51	4	19.79	11	3116.1	4	638.24	12	3754.34	9	6257.23		
Jugoslawien	63	679.77	37	399.23	1079	10.03	6	48.29	2	2657.39	6	1560.69	10	4218.08	7	7030.13		
Summe	5925.6		4829.4		10755	100												
Σ	10.755 x 10 ⁶ Tonnen																	D7

hinzunimmt, so beziffert sich der gesamtanfallende saure Regen auf etwa 17.93 Millionen Tonnen auf einer Gesamtfläche von rund 3.657 Millionen Quadratkilometern!

Vergleicht man die in der Tabelle 2 angeführten Länder, so erkennt man, daß Norwegen auf Grund der geringen Energieproduktion im Lande (Einwohnerzahl) und der Nutzung der Wasserkraft von dem gesamten sauren Niederschlag (56000 t) nur 16% selbst erzeugt. Die restlichen 84% der Schwefeldeposition kommen aus dem Ausland. Dies steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der SO_2 -Produktion überwiegend in Groß Britanien. Groß Britanien verursacht 92% der im Lande anfallenden Schwefeldioxidmenge selbst und importiert nur 8%. Da nur ein Teil der englischen Gesamtproduktion von SO_2 sich als nasse Deposition im Lande niederschlägt, geht ein großer Teil von SO_2 , verdrängt durch das Golfstromwetter, nach Festland-Europa und verteilt sich. Groß Britanien erhält auf Grund seiner Insellage, fast gar keine SO_2 -Menge zurück. Bei der insgesamt auf ein Land jährlich niedergehenden Menge an saurem Regen nimmt Groß Britanien den 7. Platz in Europa ein, aber auf Grund der großen Fläche steht es an 10. Stelle, wenn die spezifische Konzentration pro km^2 und Jahr berechnet wird. In Summen ausgedrückt sind die in Groß Britanien niedergehenden Sulphat-Schwefelmengen fast 880 Tausend Tonnen. Davon erhält Groß Britanien von anderen Ländern nur 70400 t, während 810 00 t aus eigener Produktion stammen. Der zweite große Exporteur des sauren Regens ist Italien. Italien verursacht 938.73 Tausend Tonnen Niederschlag (83%) und erhält aber nur 192.27 Tausend Tonnen vom Ausland. Das entspricht nur 17%. Jugoslawien, Frankreich und Spanien dagegen produzieren nur 54% und mehr der im eigenen Lande anfallenden sauren Regenmenge selbst. Maßgebend für die Ökologie sind die in den einzelnen Ländern insgesamt anfallenden sauren Regenmengen. Danach produziert die Bundesrepublik Deutschland 742000 Tonnen Schwefel als sauren Regen im eigenen Land, erhält aber noch 772000 Tonnen vom Ausland hinzu. Somit steht die Bundesrepublik Deutschland an der Spitze der Länder mit den größten Sulphat-Schwefel-Depositionen. Von der gesamten als sauren Regen anfallenden Schwefelmenge in Europa - es sind 10.755 Millionen Tonnen - erhält die Bundesrepublik Deutschland die

Höchstmenge, nämlich 14.07%. Dann folgen Frankreich mit 13.82%, Polen mit 13.12%, Italien mit 10.51%, Tschechoslowakei mit 10.18% sowie Jugoslawien mit 10.03%, Großbritannien erhält zwar weitaus weniger saure Regenmengen, liegt mit 8.18% immer noch sehr hoch, ebenso die DDR mit 7.57%. Österreich (2.96%), Belgien (1.94%), Niederlande (1.9%), Schweden (1.48%), Schweiz (1.29%), Spanien (1.28%), Dänemark (1.15%) und Norwegen (0.52%) gehören zu der Ländergruppe, die weniger als 3% der Depositionen erhalten.

Ganz anders sieht es aus, wenn man die spezifischen Daten ausrechnet. Rechnet man die jährliche pro Kopfkonzentration des $\text{SO}_4^{=}$ aus, so steht nicht die Bundesrepublik Deutschland an der ersten Stelle, sondern die Tschechoslowakei. Mit 71.57 kgS/(Kopf.a) Schwefelsäuren-Belastung liegt die Tschechoslowakei 1.48 mal höher als Jugoslawien, 1.67 mal höher als die DDR, 1.70 mal höher als Österreich, 1.80 mal höher als Polen. An siebter Stelle der jährlichen pro Kopf- $\text{SO}_4^{=}$ -Belastung liegt die Bundesrepublik Deutschland mit rund 34% des Tschechoslowakei-Wertes. Den 5. und den 6. Platz belegen Polen (55.4%) und Frankreich (~39%). Dann folgen die Länder, die weniger als etwa 33% der Tschechoslowakei-pro-Kopf-Belastung haben. Dies sind Dänemark (32.7%), die Schweiz (30.5%), Belgien (29.6%), Italien (27.7%), Schweden (26.7%), Großbritannien (22%), die Niederlande (20%), Norwegen (19.1%) und Spanien (5.1%).

Ein Maß für die Intensität des sauren Regens ist die spezifische Bodenkonzentration der Schwefelsäure. Den Höchstwert der Bodenkonzentration der $\text{SO}_4^{=}$ -sauren Gehaltes hat die Tschechoslowakei mit 8563.46 kgS/(km².a). Das heißt, pro Jahr fallen rd. 8600 Tonnen Schwefel pro km² Fläche als Säure auf den Boden der Tschechoslowakei. Dabei verursacht die Tschechoslowakei selbst fast die Höchstmenge (3511 kgS/(km².a)) als säurebildende $\text{SO}_4^{=}$, erhält allerdings auch fast 5050 kgS/(km².a) von den sie umgebenden Nachbarländern. Die Auswirkung liegt auf der Hand. Das Waldsterben hat dort großflächig begonnen. Mit 7525 kgS/(km².a) liegt die DDR an der zweiten Stelle. Es zeigt sich aber, daß sie im eigenen Land mehr sauren Regen produziert als sie von den Nachbarländern erhält. An der dritten Stelle liegt Belgien. Leider erhält das kleine Land, nur 30513 km² groß, 75% des sauren Regens von den anliegenden Ländern. So produ-

ziert Belgien selbst nur $1712 \text{ kgS}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, erhält aber $5137 \text{ kgS}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, die im Ausland verursacht werden. Die Bundesrepublik Deutschland nimmt den vierten Platz ein und erhält ebenfalls pro Kopf und Jahr mehr Schwefel vom Ausland in Form von saurem Regen als sie selbst produziert. Auch die Niederlande gehören leider zu den Ländern, die den Hauptteil des sauren Regens von den Nachbarstaaten erhalten. Die Niederlande nehmen den fünften Platz in den untersuchten Ländern ein. Dann folgen Polen, Jugoslawien, Österreich, Italien, Groß Britanien, Schweiz, Dänemark, Frankreich, Schweden, Spanien und Norwegen. Groß Britanien ist ein typisches Land, wie auch diese Untersuchung zeigt, das sauren Regen für die Nachbarländer verursacht (Insellage, Golfstrom). Norwegen, Schweden, Dänemark und auch die Niederlande sind unter den Empfängerländern. Die weiteren Länder, die den sauren Regen für die Nachbarländer verursachen, sind die DDR, Frankreich, Spanien, Italien sowie Jugoslawien.

Der saure Regen wird nicht nur durch Schwefeldioxid verursacht, sondern auch durch Stickoxid sowie durch Chlorid. Die Tabelle 3 zeigt Messungen in USA und Deutschland über die Anionenverteilungen/2/ des sauren Regens. Daraus ist die Anionenverteilung

Sulphat	60%
Nitrat	30%
Chlorid	10%

als Grundlage für die Berechnung der gesamten sauren Niederschlagsmenge festgelegt. Somit ergibt sich z.B. für die Bundesrepublik Deutschland eine spezifische Belastung von $10.15 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ an sauren Komponenten.

Tabelle 3: Anionenanteile des sauren Regens/2/

Kontinentale Stationen:

Sulphat	68 - 70%
Nitrat	23 - 27%
Chlorid	4 - 10%

Küstenstationen:

Sulphat	40 - 52%
Nitrat	15 - 21%
Chlorid	26 - 44%

Deutschland:

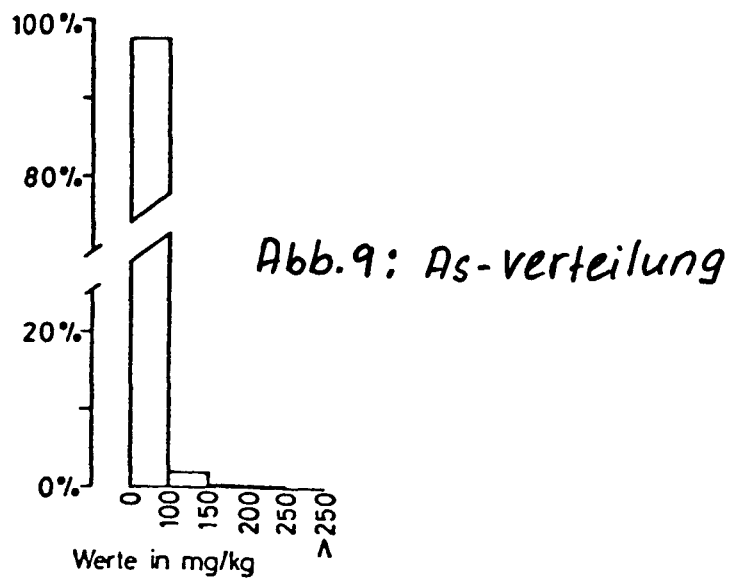
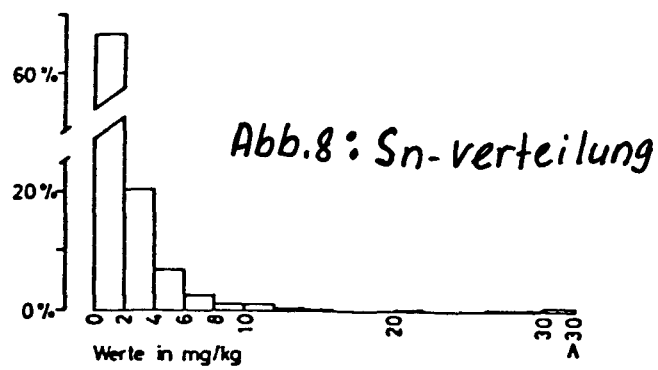
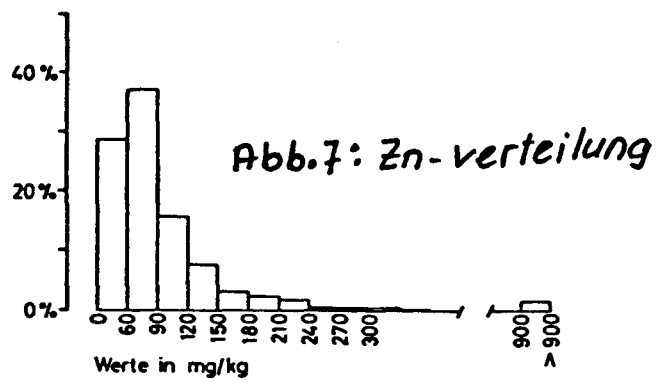
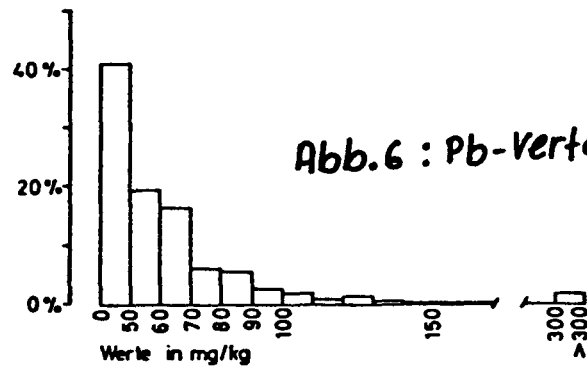
Sulphat	50 - 60%
Nitrat	25 - 30%
Chlorid	< 15%

In Küstennähe und im hochindustrialisierten Ruhrgebiet ist der Chloridgehalt höher. Der Mittelwert in Deutschland beträgt: Sulphat 60%, Nitrat 30%, Chlorid 10%. Das bedeutet, daß zu den $\text{SO}_4^{=}$ -Schwefel-Konzentrationen ($\text{kgS}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) noch etwa 30% NO_3^- -N-Komponente sowie 10% Chloridkomponente kommen. Die Chloridkonzentration von 10% ist grob geschätzt, da diese von Norden (Küstennähe) nach Süden stark abnimmt. Die letzte Säule der Tabelle 2 zeigt die Gesamtsäure-Konzentration von $\text{SO}_4^{=}$ mit 60%, NO_3^- mit 30% sowie Cl^- mit 10%.

2.3.1 Schwermetalle

Unter Schwermetalle versteht man Metalle, deren spezifisches Gewicht mehr als $5\text{g}/\text{cm}^3$ beträgt. Zu den Schwermetallen gehören unter anderem Blei(11.34), Kupfer(8.96), Cobalt(8.9), Cadmium(8.64), Eisen(7.87), Mangan(7.43), Zink(7.29). Sie werden hauptsächlich emittiert aus Bergwerken (Pb,Cu,Fe,Mn,Co,Cd,Zn,Sn), in Feuerungsanlagen(Zn,Sn,Co,Cd,Pb,Fe), von Kraftfahrzeugen und Flugzeugen(Pb) und im wesentlichen durch Abfälle im Feinstaub oder Flugasche/7/, durch Düngemittel(Cd in Phosphat,Fe,Mn,Co,Zn,Cu) sowie durch Pflanzenschutzmittel(Pb,As,Cu,Zn) verteilt. Früher oder später gelangen sie alle auf die Erdoberfläche und zwar durch trockene und nasse Deposition. Hier spielt der saure Niederschlag eine wichtige Rolle. Wenn der pH-Wert kleiner wird, etwa unter 5, werden die Schwermetalle gelöst. Es werden Kationen (Kationsäuren) frei und nehmen an den in dem Boden stattfindenden chemischen Prozessen teil. Die Untersuchungen von Kick/6/ beschränken sich auf die landwirtschaftlich- und gärtnerisch genutzten Böden von Nordrhein-Westfalen. Auch das Umweltbundesamt, Berlin/2/, hat die bundesweite Untersuchung unter anderem über die Schwermetallbelastung durchgeführt. Diese beiden Untersuchungsergebnisse sind in diesem Bericht analysiert worden.

Die Abb.6-14 zeigen die Untersuchungsergebnisse von Kick/6/.



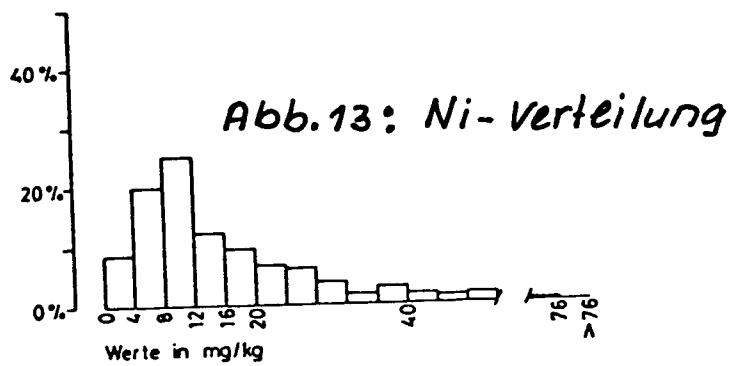
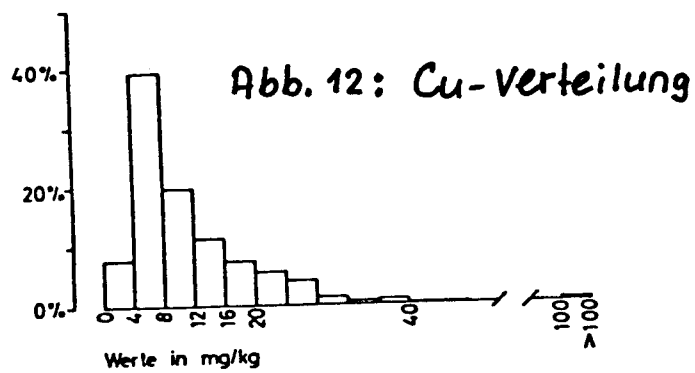
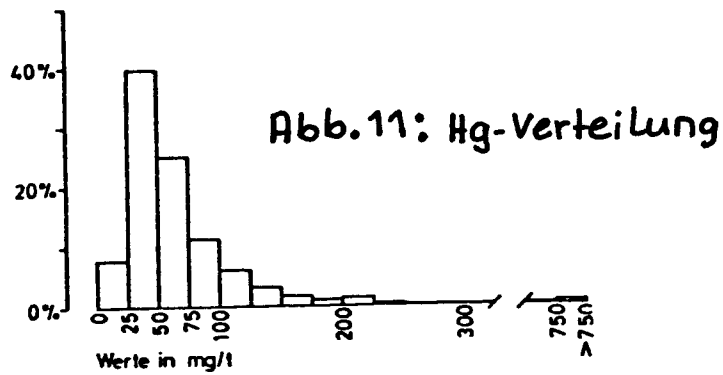
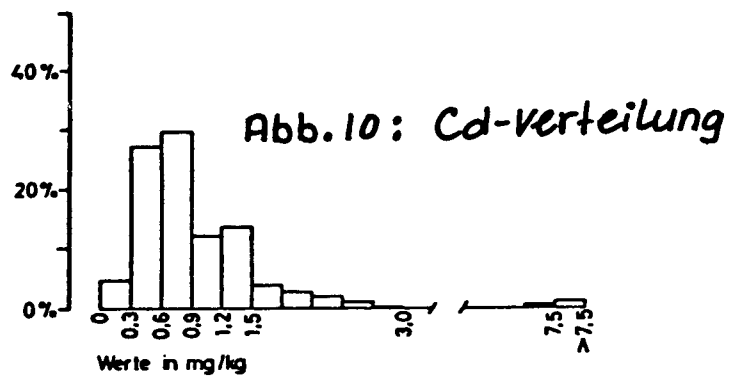
Die Abb.6 zeigt die Pb-Verteilung. Es zeigt sich, daß 40% der Proben einen Bleiinhalt zwischen 0-50mg/kg Probe hatten. 20% der Proben hatten einen Pb-Gehalt zwischen 50 und 60mg/kg, 18% der Proben hatten die Pb-Konzentration zwischen 60-70mg/kg. Etwa 22% der Proben haben eine Konzentration zwischen 60 und 300mg/kg. Es ist erwähnenswert, daß etwa ca. 2% der Proben gewaltige Bleikonzentrationen von 300mg/kg und mehr hatten. Dies zeigt die Breitenverteilung des gefährlichen toxischen Stoffes.

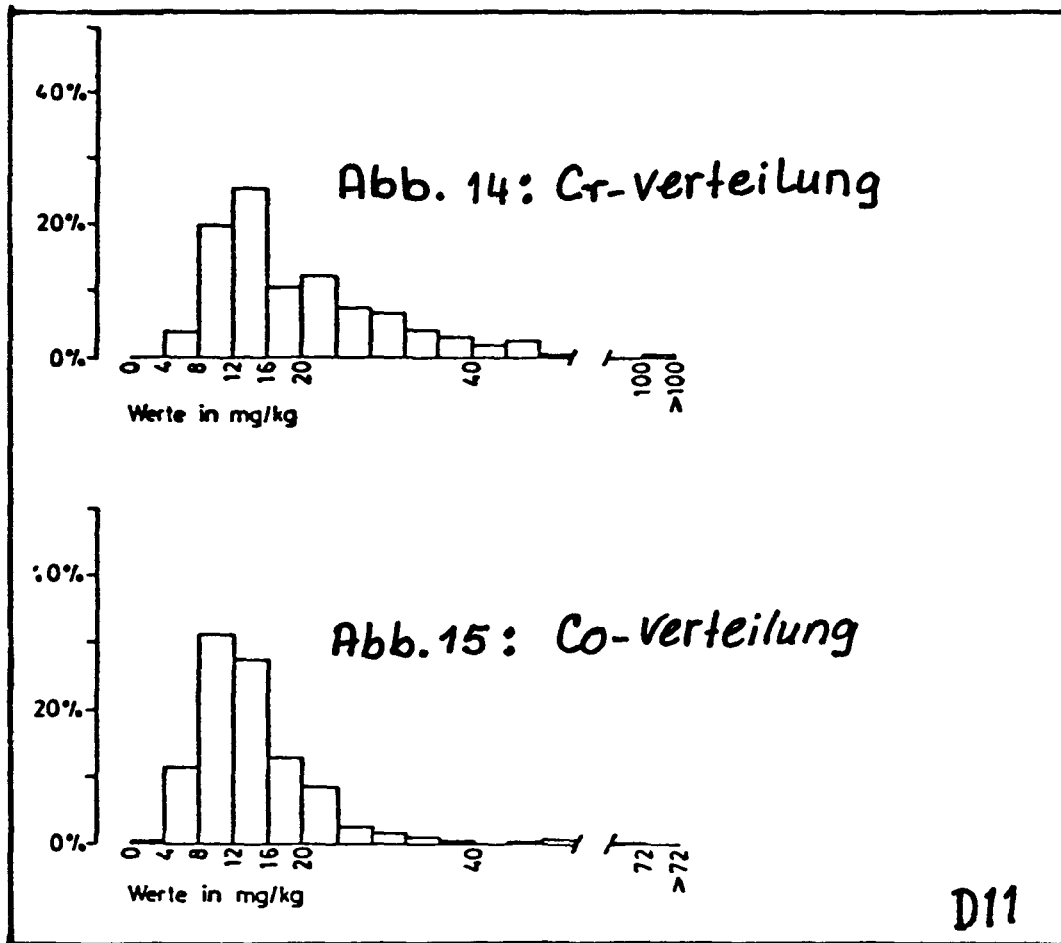
Die Abb.7 zeigt die Zinkverteilung. Etwa 70% der Proben enthielten die Zn-Konzentration zwischen 0-90mg/kg. 30% der Proben haben die Konzentration 90 und 900. Etwa 1% der Proben haben die Konzentration von 900 und mehr. Zink hat eine sehr große Breitbandkonzentration. Der Streubereich der Konzentration bei der Zinnverteilung, wie er in der Abb.8 dargestellt wird, ist nicht sehr groß. 70% der Proben haben die Konzentration bis 2mg/kg, 20% bis 4mg/kg und etwa 6% bis etwa 20mg/kg. Eine Probe hatte den Sn-Gehalt von 30mg/kg und mehr (Abb.8). Fast eine gleichmäßige Verteilung hat Arsen, dessen Werte in der Abb.9 dargestellt werden. Fast 98% der Proben haben eine As-Konzentration von 0-100mg/kg. Die Konzentrationen der restlichen Proben gehen bis 250mg/kg. Diese Werte zeigen die große Verbreitung von As.

Der gefährlich-toxische Stoff Cadmium verteilt sich in weiten Gebieten wie die Abb.10 darstellt. Die Konzentration von Cadmium streut zwischen 0 und 7.5mg/kg. Etwa 83% der Proben haben die hohen Konzentrationen zwischen 0.3 und 1.5mg/kg. Dieses Bild zeigt eindeutig, daß weite Gebiete eine hohe Konzentration von Cadmium haben. Das Bild zeigt weiter, daß sogar etwa 1% der Proben (~5 Proben) eine Konzentration von 7.5mg/kg und mehr haben. Auch Quecksilber in der Abb.11 zeigt eine hohe Verbreitung. Rund 70% der Proben haben eine Hg-Konzentration, die zwischen 25 und 100mg/t liegt. Eine geringe Menge hat sogar mehr als 750mg/t Quecksilberinhalt.

Die Konzentration des Kupfers wird in der Abb.12 dargestellt. Bei etwa 60% der Proben liegt die Cu-Konzentration zwischen 4 und 12mg/kg. Die höhere Konzentration verteilt sich in den rd. 40% der Proben.

Das Nickel (Abb.13) hat praktisch das gleiche Verbreitungsspek-





trum wie Chrom (Abb.14).

Ein erschreckendes Bild zeigt die Abb.15. Nur etwa 11% der Proben haben den geringen Kobaltwert von 4-8mg/kg. Dagegen aber haben etwa 85% Co-Gehalte, die zwischen 8 und 40mg/kg liegen. Es gibt sogar Proben, die 72mg/kg und mehr Co-Konzentration haben.

Die Tabelle 4 stellt eine Zusammenfassung der Daten dar, die sich aus den Abb.6-15 ergeben. Hierin sind noch einmal die Daten des Stollberger Raums hervorgehoben. In diesem Raum gibt es höchste Konzentrationen von Pb,Zn,Sn,Cd,Hg,Cu,Ni,Cr und Co. Sicherlich ist das Pb- und Zn-Bergwerk in Stollberg der Hauptverursacher dieser immens hohen Konzentration der Schwermetalle.

Eine Vergleichsmöglichkeit bietet der Bericht des Umweltbundesamtes in Berlin. Diese Studie zeigt sich insofern als sehr hilfreich, als das gemessene Schwermetall-Konzentrationspektrum im ganzen Bundesgebiet sich analysieren läßt(Abb.3). Hier hat man die Vergleichsmöglichkeit zwischen Immissionswerten und den Werten der feuchten und trockenen Depositionen. Die Abb.16 zeigt die gemessenen Immissionswerte der Schwermetalle. Wie die Messungen ergeben haben, wird die Bleiimmission fast zu 75% durch Kraftfahrzeuge verursacht. so liegen die Höchstwerte von Pb in Essen und Frankfurt zwischen 0.28 und 0.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Das bedeutet, daß diese Immissionswerte 5 bzw. 4.5mal höher sind als die gemessenen kleinsten Werte von 0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ auf dem kleinen Feldberg.

Vergleicht man die Werte der feuchten und trockenen Depositionen(Abb.17)mit den Immissionswerten, so stellt man fest, daß im Ruhrgebiet erschreckend hohe Bleimengen Jahr für Jahr niedergehen. Der Maximalwert der feuchten Deposition liegt bei 52.2kg/(km².a).Das bedeutet, daß die Konzentration fast 3.9 mal höher ist als der kleinste Wert in Deuselbach. Es zeigt sich dagegen, daß in Frankfurt, Hamburg, Jülich und in Schleswig die feuchte Blei-Deposition genau so groß ist wie im Hohen Feissenberg. Die Maximalwerte bei der trockenen Deposition liegen jedoch nicht im Ballungsgebiet Essen, sondern in Frankfurt. Dies dürfte auf zusätzliche Auswaschungen aus dem Taunus zurückzuführen sein. Dagegen liegen die niedrigsten Werte in Deuselbach bei 3 $\mu\text{g}/(\text{m}^2.\text{d})$.Danach sind die Konzentrationen in Frankfurt 10.5mal und in Essen 8.8mal größer.

Tabelle 4 : Mittlerer Schwermetallnachweis
in landwirtschaftlich genutzten
Böden von NRW in (%) der
untersuchten Proben (472 Proben)

Schwermetalle	Stolberger Raum	NRW- gesamt
Blei	67	76
Zink	67	37
Zinn	67	87
Cadmium	78	83
Quecksilber	67	90
Kupfer	67	—
Nickel	67	—
Chrom	89	81
Kobalt	89	92
		D12

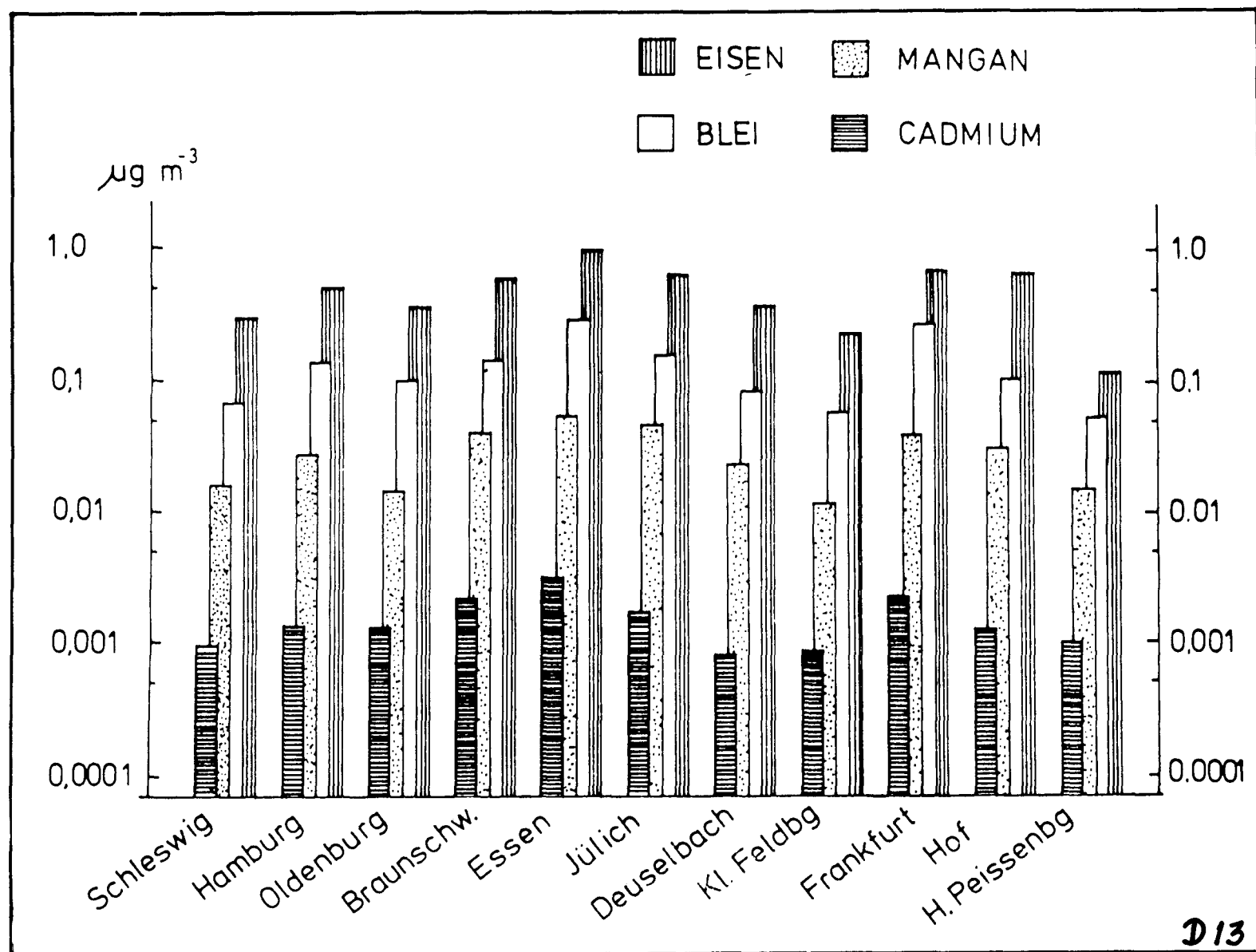


Abb.16: Mittlere Schwermetallimmission [2]



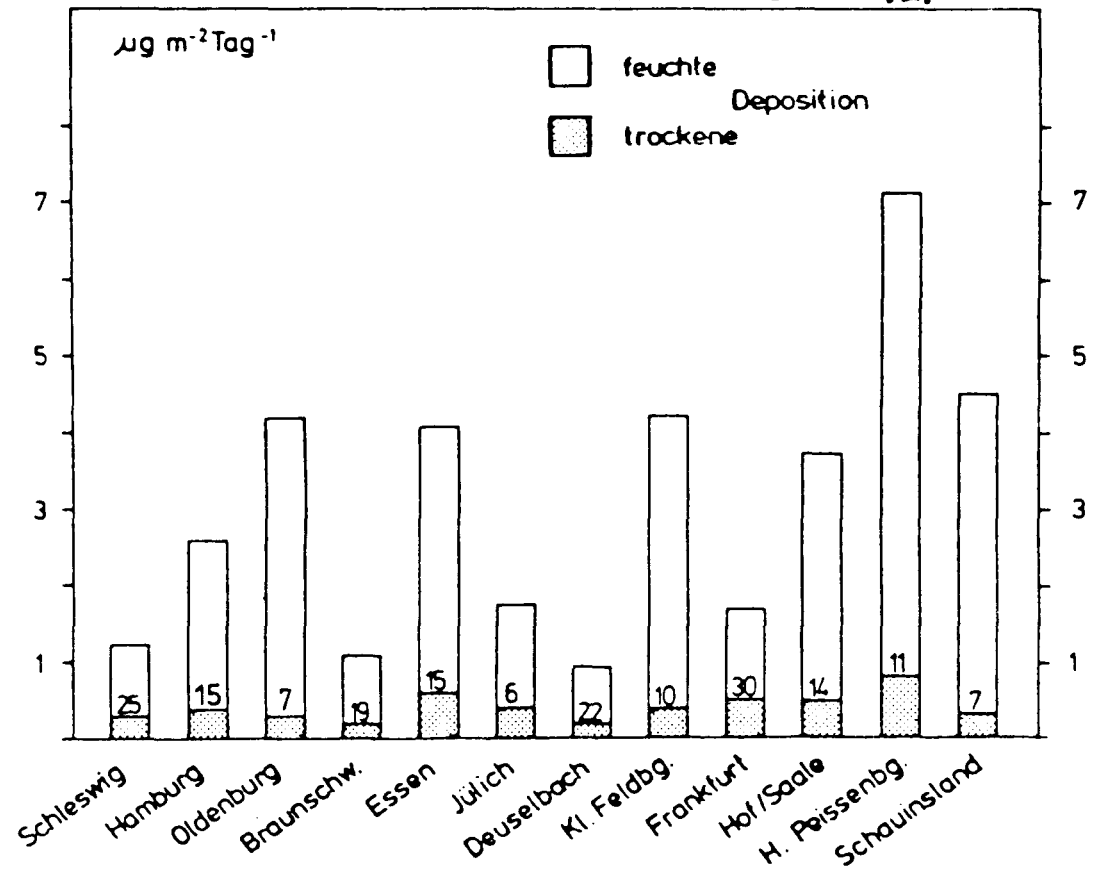
Die Cadmiumverteilung bei den Immissionsmessungen zeigen, daß, wie beim Blei, auch beim Cadmium, die höchsten Konzentrationen in Essen und Frankfurt liegen. Vergleicht man den niedrigsten Wert von $0.0008 \mu\text{g}/\text{m}^3$ von Deuselbach mit den Maximalwerten in Essen und Frankfurt, so kann festgestellt werden, daß die Cd-Immission in Essen nur etwa 5mal und in Frankfurt rd. 3.8mal höher ist als der kleinste Wert. Diese Tatsache zeigt, wie auch Kick in der Abb.10 festgestellt hat, daß Cadmium auf dem Bundesgebiet sehr breitflächig verteilt ist. Die Immissionsanalyse wird auch durch die Messung der feuchten und trockenen Depositionen von Cadmium bestätigt (Abb.18). Der maximal feuchte Depositionswert liegt auf dem hohen Peissenberg bei $6.4 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{d}$ (rd. $2.34\text{kg}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$). Auch dieser Wert kommt wahrscheinlich durch die anthropogenen Quellen zustande. Dieser Höchstwert ist um 10.3mal größer als der Wert in Deuselbach, wo die Cd-Konzentration $0.8 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ beträgt.

Auch bei der trockenen Deposition hält der Hohe Peissenberg den Spitzenwert von $0.79 \mu\text{gCd}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ gegenüber dem kleinsten Wert von $0.18 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ in Deuselbach. Diese Werte variieren in verschiedenen Jahreszeiten. So ist selbst auf dem Hohen Peissenberg im Herbst/Sommer ein Höchstwert gemessen worden, der 3mal größer ist als der Wert in Essen.

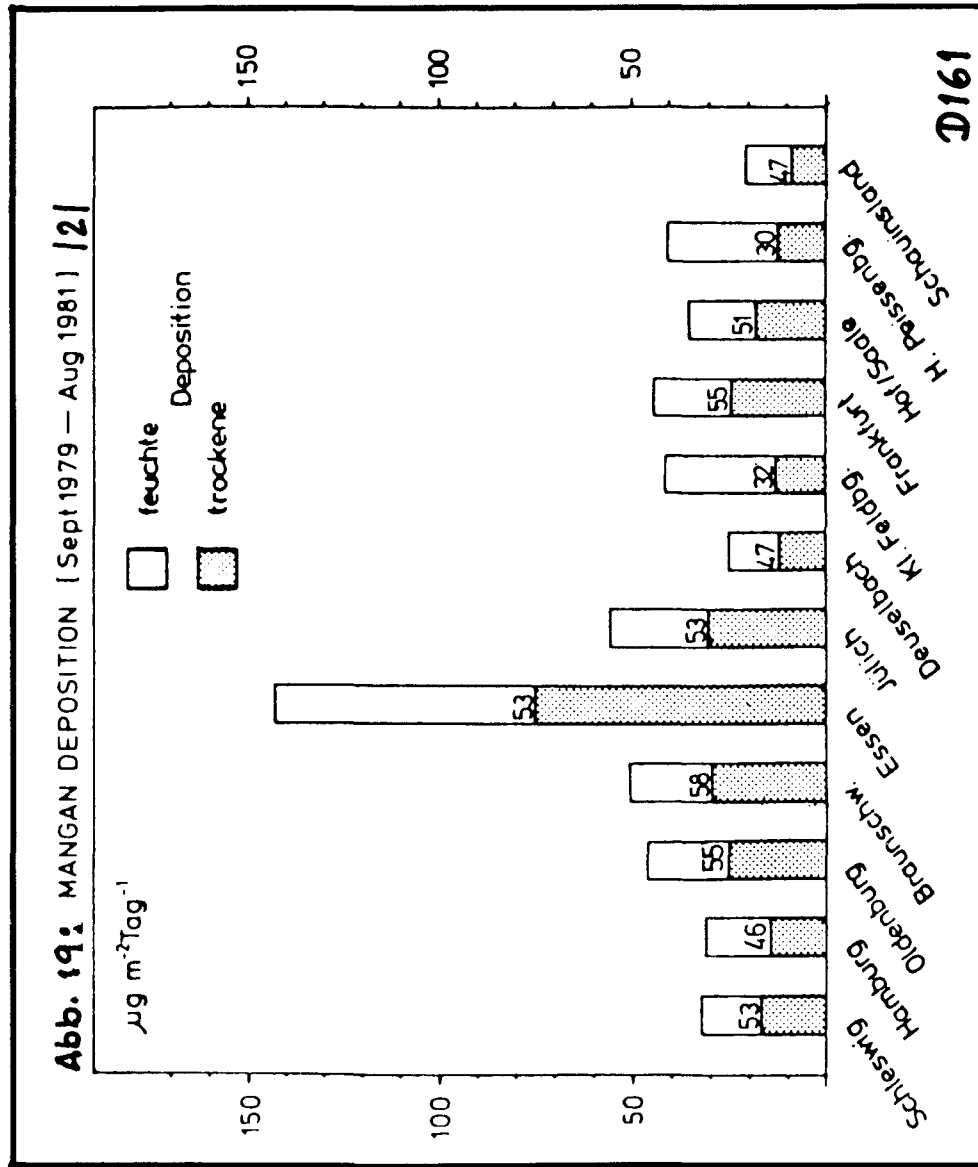
Die trockene Deposition von Cadmium ist deswegen besonders toxisch, weil dieses aus 40-60% wasserlöslichen Verbindungen besteht, und der durchschnittliche pH-Wert des sauren Niederschlages bei 4.1 liegt.

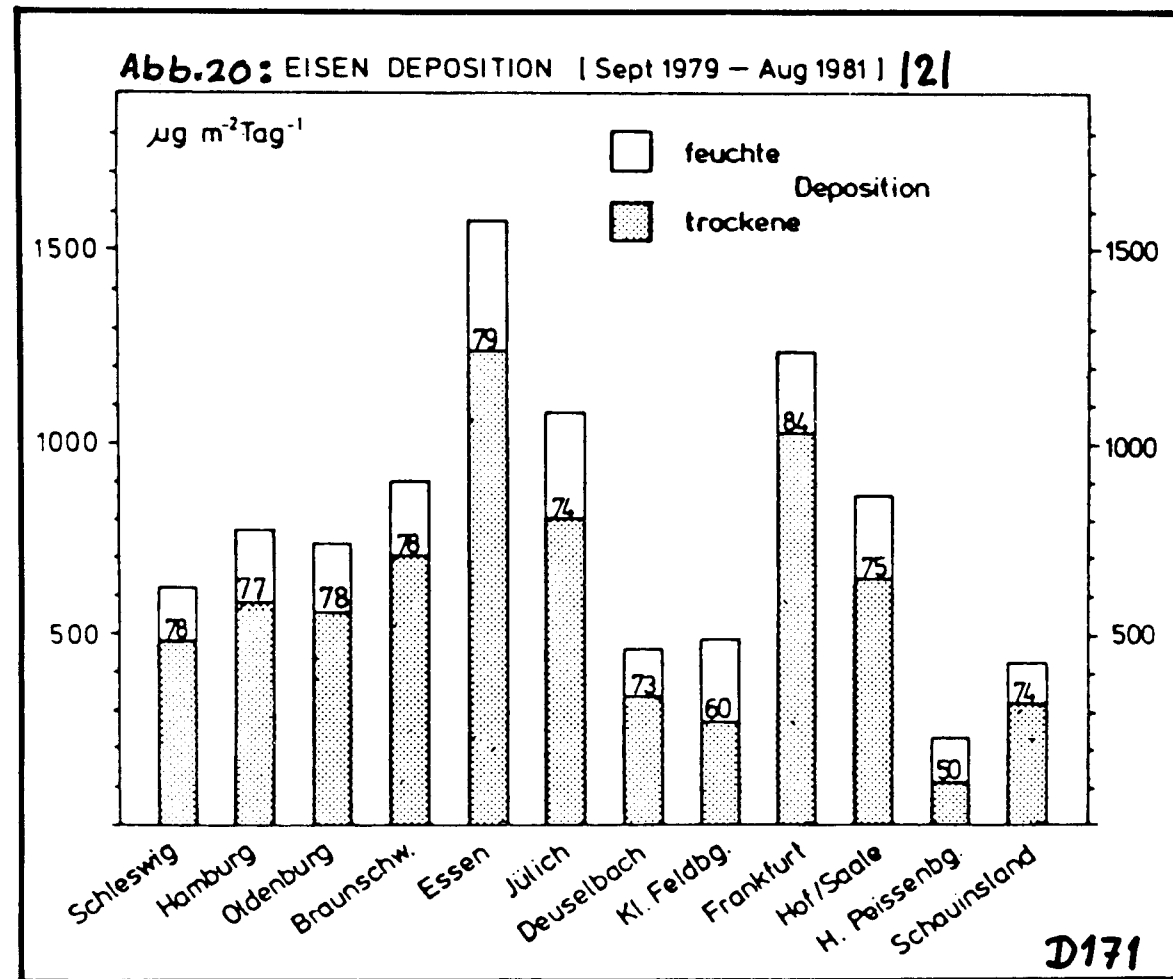
Die Mangan- und Eisen-Immissionen hängen zusammen. Die Mangan-Immission hat ihren höchsten Wert in Essen und Frankfurt, wo auch Schwerindustrien mit Eisenverarbeitung anzutreffen sind. In Essen werden auch die höchsten Fe-Immissionen von rd. $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen. Fast genau so hoch liegen die Werte in Frankfurt und in Hof (Kraftfahrzeugschrottverarbeitungsbetrieb). Auch in Jülich (Braunkohlenabbau) und Braunschweig (Schwerindustrie) sind die Werte sehr hoch. So liegen die Werte zwischen 1 (Essen) und $0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Hoher Peissenberg). Dagegen liegen die Mn-Immissionswerte zwischen 0.015 und $0.011 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die trockenen und feuchten Depositionsmeßwerte sind für Mangan in der Abb.19 dargestellt. Hierbei liegen die feuchten Depositionswerte zwischen 10 und $26 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ mit der Ausnahme in Essen.

Abb.18: CADMIUM DEPOSITION [Sept1979 – Aug1981] **/2/**



D151





Dort liegen die Werte bis $67 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. Das bedeutet, daß Essen eine 2.6 bis 6.7mal höhere feuchte Deposition hat als das restliche Bundesgebiet. Die trockene Deposition zeigt, daß Essen ebenfalls die höchste trockene Deposition im gesamten Bundesgebiet hat. Sie beträgt $76 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ und liegt damit 6.3mal höher als beispielsweise auf dem Hohen Peissenberg. Dadurch, daß die deponierten Manganverbindungen bis zu 50% wasserlöslich sind, werden sie leicht durch den sauren Regen in die Bodenlösung gebracht und von den Wurzelhaaren leicht aufgenommen.

Die feuchten Depositionswerte von Eisen liegen zwischen $333 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ im Ruhrgebiet, das entspricht $123 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, und $20\text{--}30 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ im Bundesgebiet. Diese Werte sind in der Abb. 20 dargestellt. Die trockenen Immissionswerte liegen zwischen $1.24 \text{ mgFe}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ in Essen, $1.03 \text{ mgFe}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ in Frankfurt und $0.11 \text{ mgFe}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ auf dem Hohen Peissenberg.

3. Der Boden, der saure Regen sowie der Aufnahmemechanismus der Nähr- und Schadstoffe durch die Pflanzenwurzeln.

Der Boden ist ein heterogenes System verschiedenartiger Komponenten/11/. Die erste Komponente besteht aus festen Bestandteilen. Diese sind die organischen und die anorganischen Partikel, die den Mineralkörper und die Humusanteile des festen Bodens bilden. Die feste Komponente des Bodens hat die Funktion, Nährstoffe für die Pflanze zu speichern. Sie enthält die Pflanzennährstoffe N, K, Ca, Mg, P, S, Cl, Fe, Mn, Zn, Cu. Die speichernde Eigenschaft dieser Minerale und der Humuskörper ergibt sich aus der Tatsache, daß diese Substanzen im Innern und an der Oberfläche Ionen binden.

Die zweite Komponente ist die Bodenlösung (Wasser + Lösungsanteile). Diese flüssige Phase ermöglicht den Transport der Nährstoffe zu der Pflanze und wirkt als Reagenzsystem, in dem biologisch-chemische und physikalische Prozesse stattfinden. Diese Prozesse ermöglichen der Pflanze die Aufnahme der Nährstoffe. Zu diesen Prozessen gehören der Abbau der organischen Stoffe durch die Mikroorganismen (Bakterien), kleine Pilze und Algen, die Aufnahme des molekularen Stickstoffes durch die Symbionten. Wegen ihrer großen Zahl und ihrer hohen Stoffwechselaktivität sind die Mikroorganismen sehr wichtig für die Pflanze (Brechung und Auflösung der im Boden vorhandenen Salze). Die Mikroorganis-

men sind sogar in der Lage, die mobilen und leicht mobilisierbaren Nährstoffe in schwer mobilisierbare Nährstoffe umzuwandeln, um sie vorübergehend von den Nährstoffen zu trennen. Diese Funktion der Mikroorganismen ist die Fixierung. Nach Bedarf werden wieder die schwer mobilisierbaren Nährstoffe in mobile und leicht mobile umgewandelt und zwar durch den Defixierungsprozeß/13/.

Die dritte Komponente ist die gasförmige Phase. Zu dieser Gruppe gehört die Bodenluft. Auf den Boden fallen Blätter, trockene Äste und andere organische (Tierexkrementen usw.) und anorganische Stoffe. Durch das Wasser werden sie durchnäßt und von Bakterien, Pilzen und Kleinlebewesen (Würmer, Käfer, Insektenlarven) zersetzt. Auch innerhalb des Bodens geht der Zersetzungsprozeß weiter. Dabei muß man zwischen den leicht zersetzbaren Stoffen wie dem Stoffgemisch aus pflanzlichen Rückständen, abgestorbenen Lebewesen sowie Stoffwechselprodukten und den schwer zersetzbaren Stoffen des Stoffgemisches aus hochpolymeren Verbindungen, den Huminsäuren, unterscheiden.

Es bilden sich durch die Zersetzungsprozesse Nährstoffe. Regenwürmer und andere Erdbewohner wühlen den Boden auf und durchmischen dadurch den Humus und die Tonmineralien. Dadurch gelangen die Nährstoffe tiefer in die Erde. Die so entstandene Erde ist die Umwelt der Mikroorganismen und anderer Tiere des Bodens, die für das Pflanzenleben unentbehrlich sind. Sie ist auch die Umwelt der Pflanzenwurzeln. Die Zusammenarbeit dieser beiden ist so lange im Gleichgewicht bis ein Störfaktor, Z.B. der saure Regen, in das System zerstörend eindringt. Die Partnerschaft dieser beiden Komponenten -die Pflanzenwurzeln und die in der Erde lebenden Lebewesen- ermöglicht die Abfallverwertung des Ökosystems. Die zwei dabei ablaufenden Teilprozesse im Stoffkreislauf sind die Produktion der Biomasse sowie der Verbrauch dieser Biomasse und der in der Biomasse vorhandenen Salze(Ionen)/12/. Bei der Produktion der Biomasse entstehen ebenfalls Säuren. Durch selektive Aufnahme werden diese Säuren abgebaut. Die Stoffkreisläufe bleiben dadurch im Gleichgewicht, daß im Sommer der Wiederverbrauch an Biomasse verstärkt vorgenommen wird als deren Produktion. In kühlen und feuchten Jahren beschleunigt sich die Nettoproduktion der Biomasse und auch an Säuren. Wird Säure produziert, so wird sie in gewissen Mengen

in den Kalk- und Silikatpufferbereichen der entsprechenden Böden wieder neutralisiert. In dieser Art und Weise wird das Gleichgewicht erhalten, vorausgesetzt, daß keine größere und andauernde Störung von außen in das System eingreift. Durch die Eigenschaft des sauren Regens wird das Gleichgewicht des Stoffkreislaufes gestört. Die Abb.21 zeigt schematisch den Nährstoffkreislauf/15/

3.1 Die Pflanzenwurzeln - ihre Organe und die Aufnahmewege der Nährstoffe

Die Pflanzenwurzeln haben die Funktion der Verankerung der Pflanze im Boden, ferner der Aufnahme und Weiterleitung der Nährstoffe in der Pflanze. Wurzelausscheidungen ermöglichen darüberhinaus die Nährstoffmobilisation. Die Wurzeln sind bedeckt mit Millionen von Wurzelhaaren, die einige mm lang und etwa 0.02 mm dick sind. Zusammen gemessen kämen diese bei größeren Pflanzen auf eine Länge von 10-50 km. Sie leben 2-3 Tage und werden ununterbrochen neu gebildet. Die wichtigsten Organe der Wurzel sind diese Wurzelhaare. Die gewaltige Oberfläche, die diese Wurzelhaare zusammen bilden, dient der Nährstoff- und Wasseraufnahme. Die Abb.22 zeigt einen Längsschnitt durch die Wurzel einer Pflanze. Eine Feinwurzel ist in drei Zonen eingeteilt. Die Wachstumszone befindet sich am Ende der Feinwurzel mit dem Vegetationspunkt mit Wurzelhaube. Die Wurzelhaare befinden sich in der mittleren Zone. Die Leitgefäße sind für den Abtransport der Nährlösung da.

Die Aufnahme in eine Zelle

Wie die Nährionen aus der Bodenlösung durch die Zellwand zum Plasma(Zytoplasma) einer Zelle gelangen, wird in Abb.22a schematisch dargestellt. Bevor die Nährionen zum Plasma(Zellkern) gelangen können, drängen sie durch röhrenförmige Öffnungen in die Zellwand ein. Die Nährionen sind kleiner als diese Öffnungen und so finden sie mit dem Wasser durch die vergleichsweise weiten Maschen im Geflecht der Fasermaschen den Weg zur Zellwand. Die Zellwand besteht aus "scheinbar freien Räumen", in denen die Ionen frei beweglich sind. Zwischen der Zellwand und dem Plasma befindet sich eine Grenzfläche, genannt Plasmalemma.

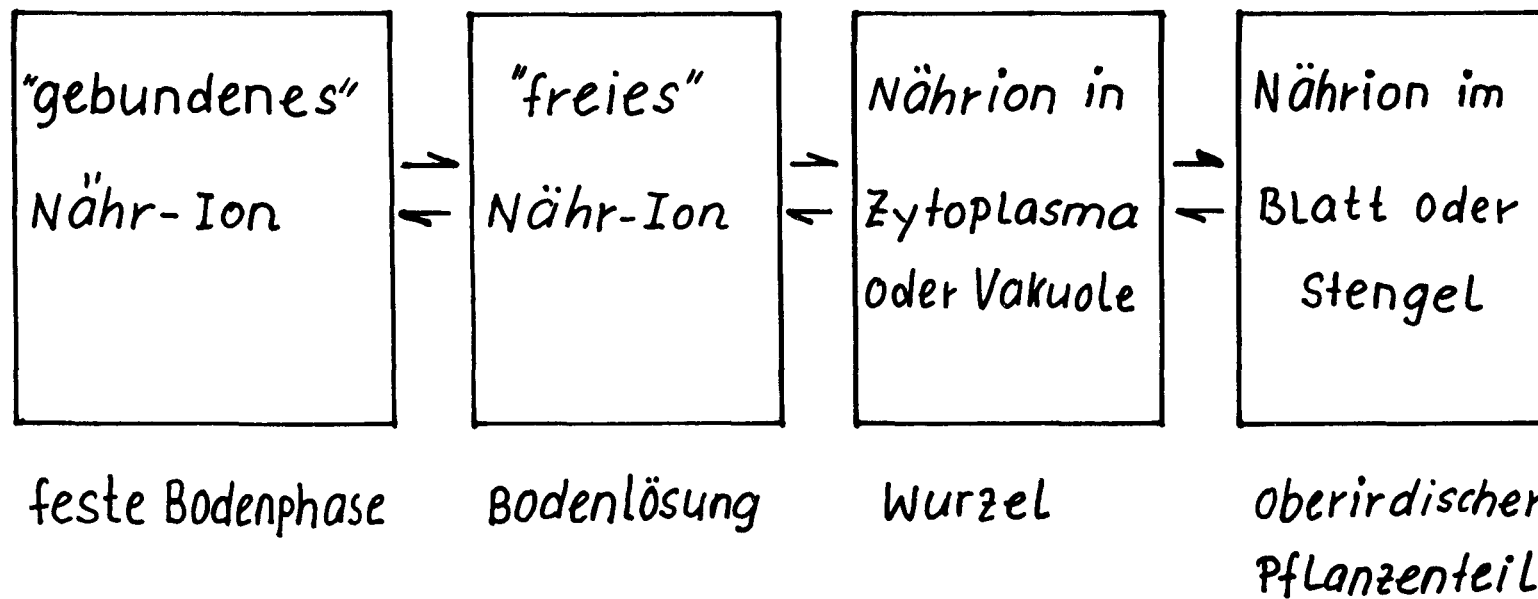


Abb.21: Transport der Nähr-Ionen von der festen Phase des Bodens bis zu den oberirdischen Pflanzenteilen |15|

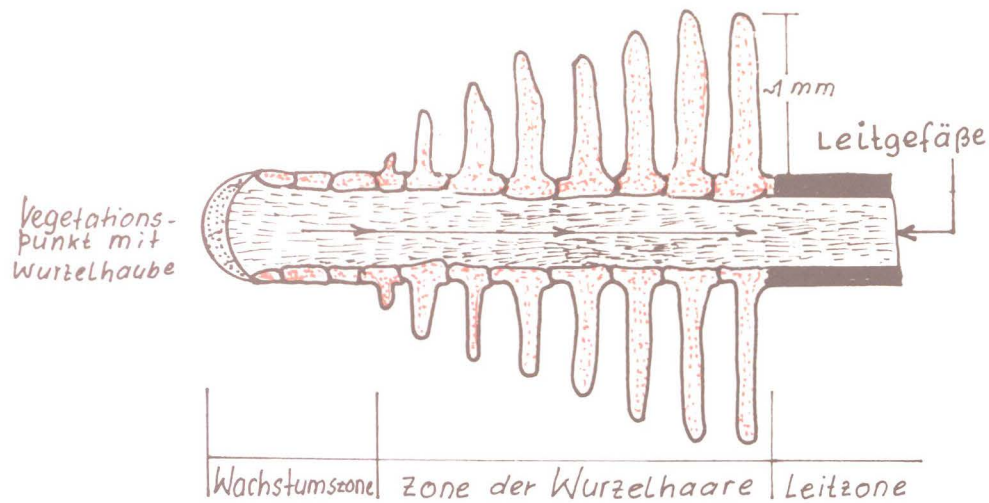


Abb. 22: Längsschnitt durch eine Feinwurzel [13]

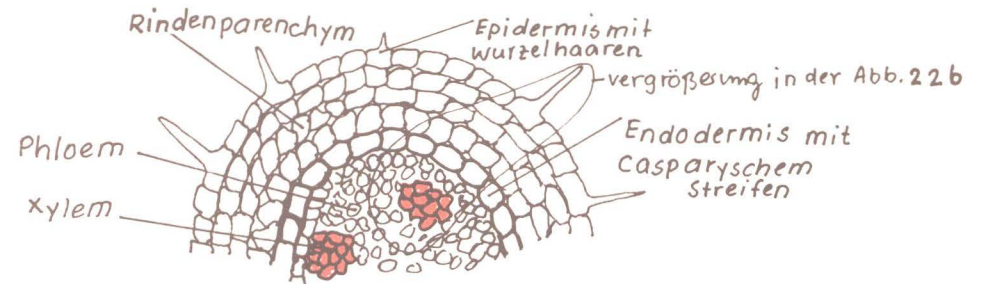
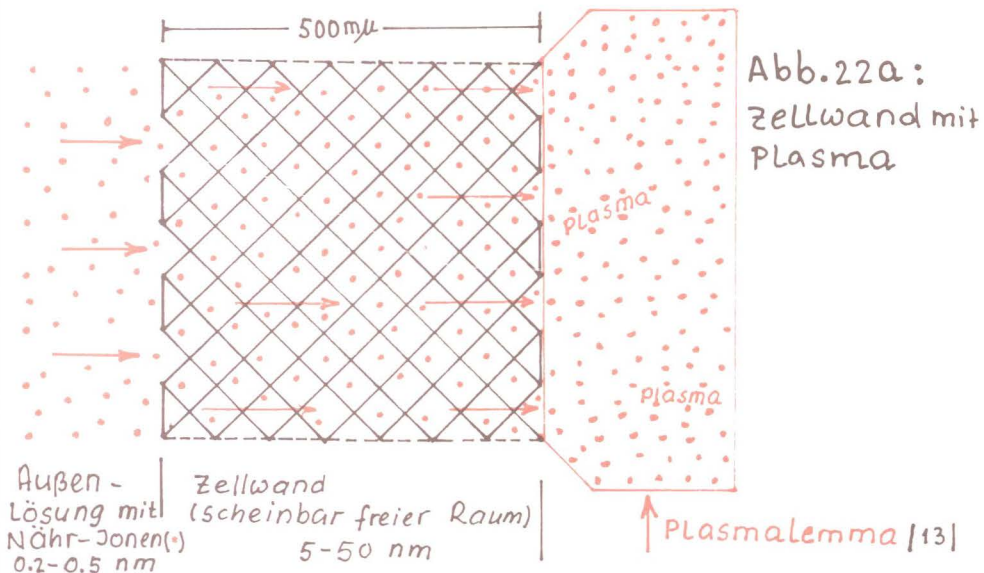


Abb. 22b: Querschnitt durch eine Wurzel [11]

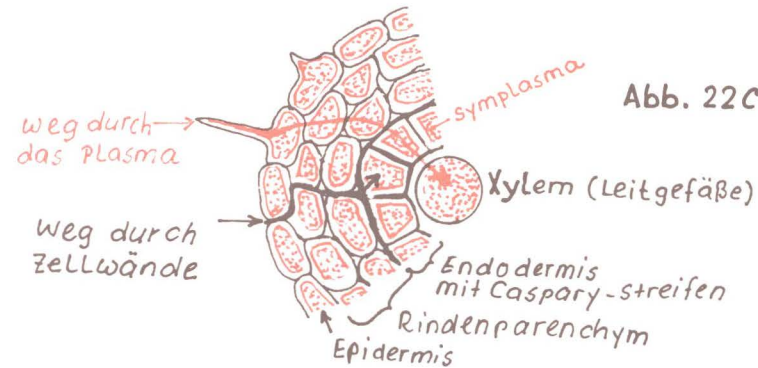


Abb. 22c: Nährstofftransport [13]

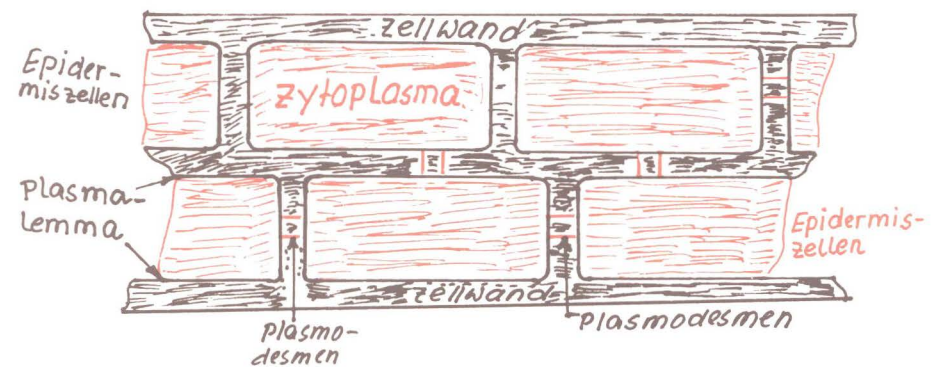


Abb. 22d: Die Plasmatische Verbindung von Zelle zu Zelle

Diese Grenzfläche wird von den Ionen durchquert, bevor diese in das Plasma(Zytoplasma) der Zelle gelangen. Das Transportsystem des Nährstoffes von Zelle zu Zelle läßt sich erklären, wenn man den Wurzelquerschnitt schematisch darstellt. Die Abb.22b zeigt einen Wurzelquerschnitt.

Die Epidermiszellen mit den Wurzelhaaren bilden die äußere Schicht einer Feinwurzel. Über diese Zellen werden, wie die Abb.22a zeigt, die Nährstoffe aufgenommen. Danach schließen sich mehrere Reihen von Zellen an, die Rindenparenchymzellen, diese setzen den von der Zelle zu bewegendenden Nährionen keinen Widerstand entgegen. Die gesamte Wurzelstruktur besteht aus zwei Bereichen. Der äußere Bereich wird aus den Epidermiszellen und den Rindenparenchymzellen gebildet. Der innere Bereich wird aus den Epidermiszellen, den Phloemzellen sowie den Xylemzellen gebildet. Diese beiden Bereiche werden durch die Casparyschen Streifen voneinander getrennt. Die Casparyschen Streifen stellen eine Sperre dar, die von den Ionen überwunden werden muß. Unmittelbar nach den Casparyschen Streifen sind die Endodermiszellen angeordnet. Den inneren Kern bilden die Phloemzellen, in denen auch die Xylemzellengruppen eingebettet sind. Die Xylemzellen sind die Leitgefäße der Wurzeln, mit deren Hilfe die Nährstoffe und das Wasser in die Pflanzenteile transportiert werden. Die Phloemzellen haben die Aufgabe, die Nährionen- und Wasserbewegung so zu regulieren, daß diese schließlich in den Xylemzellen ankommen.

Die Aufnahmewege durch die Wurzeln

Eine Vergrößerung des in der Abb.22b eingekreisten Abschnittes wird in der Abb.22c schematisch dargestellt. Es gibt grundsätzlich zwei mögliche Transportwege für Nährionen und für Wasser von der Bodenlösung bis zu den Xylemzellen. Der erste Weg geht wie folgt vor sich:

In dem Längsschnitt ist zu sehen, daß die Nährionen durch röhrenförmige Öffnungen in den Zellenwänden der Wurzelhaare aufgenommen werden. Die Ionen durchqueren die Zellwand durch "scheinbar freien Raum". Wie die Abb.22a zeigt, ist die Zellenwand bei der Plasmalemma an verschiedenen Stellen durchbrochen. Durch diese Unterbrechungen, genannt Plasmodesmen(Abb.22d), wird der Stofftransport von Zelle zu Zelle ermöglicht. Die

Plasmodesmen sind die Verbindungswände, mit deren Hilfe die einzelnen Zellen miteinander verbunden sind. Dagegen ist die Plasmalemma eine Membran, die die Abgrenzung zwischen Zytoplasma und Zellwand darstellt.

Die Ionen überwinden die Casparyschen Streifen und gelangen über die Endodermiszellen zu den Xylemzellen.

Der zweite Weg führt die Nährionen nur über die Zellwände bis zu den Casparyschen Streifen. Die Casparyschen Streifen erzeugen einen sehr großen Diffusionswiderstand und machen den Stoffübergang fast unmöglich. Die Nährionen und das Wasser überwinden die Casparyschen Streifen dadurch, daß sie über die Plasmodesmen in die Endodermiszellen gelangen, um von dort die Xylemzellengruppen zu erreichen. Dieser Weg ist der passive Weg.

3.2 Nähr- und Schadstoffaufnahme und deren Transport

Die organischen- und anorganischen Stoffe werden von den Pflanzenwurzeln hauptsächlich in Ionenform aber auch in ungeladener Form aufgenommen/17/. So werden Stickstoff als NO_3^- oder NH_4^+ , Phosphor als HPO_4^- oder H_2PO_4^- , Schwefel als Sulphat(SO_4^-), Molybdän als Molybdat, Kohlenstoff als HCO_3^- und CO_2 aufgenommen. Die Schwermetalle wie Pb, Cd, Ni, Fe, Mn usw. gehen als positive Metallionen in die Nährlösung ein. Wie die Ionen aufgenommen werden, wird in dem nachstehenden Kapitel erläutert. Die Abb.22e verdeutlicht die einzelnen Bindungsformen.

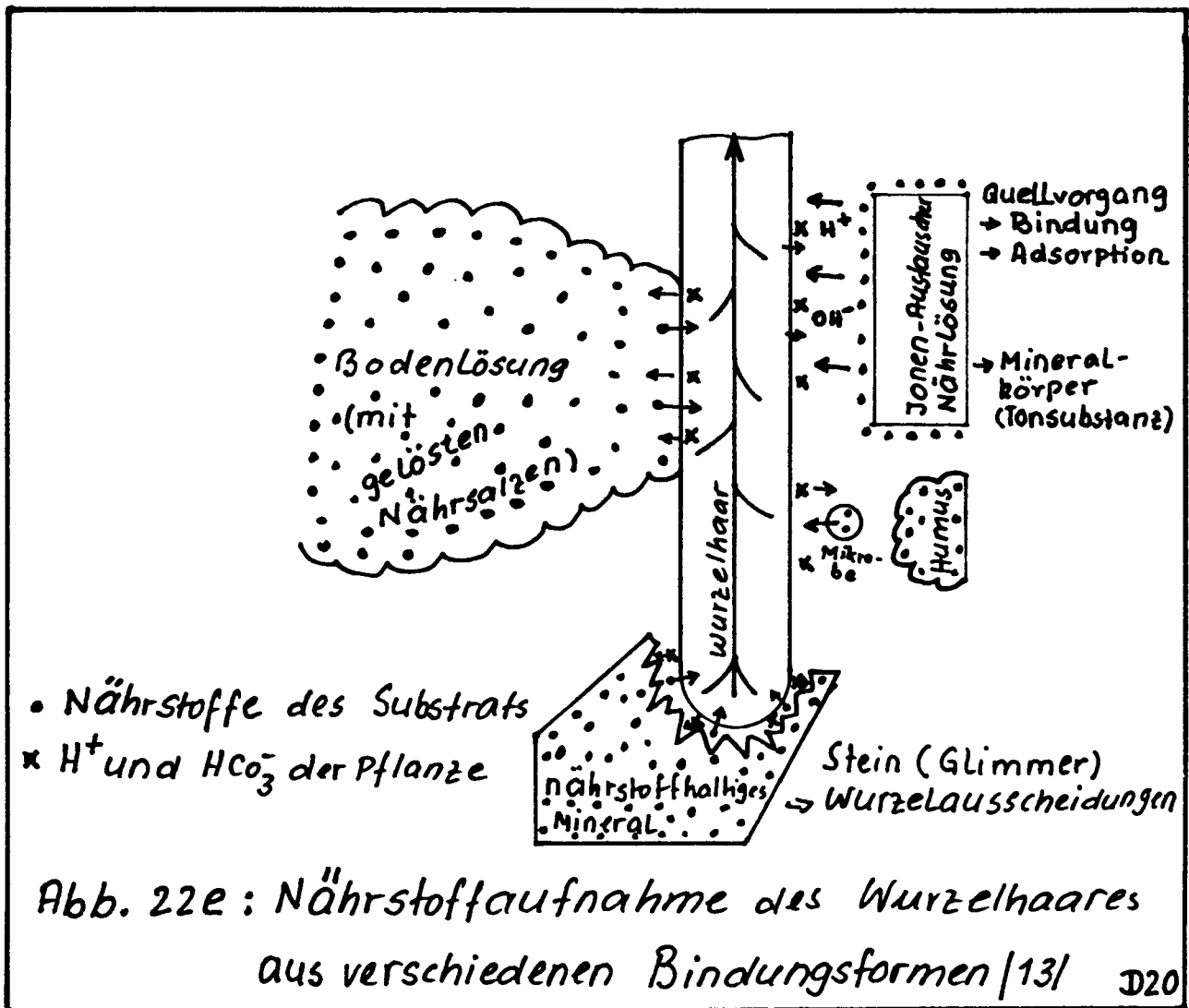
3.2.1 Aufnahme von Nährionen

1. Die Aufnahme aus Reserve-Nährstoffen

Die im Mineral- und Humuskörper gespeicherten und schwer mobilisierbaren Nährstoffe werden durch die Mikroorganismen und die Pflanze in mobilisierbare und leicht mobilisierbare Nährstoffe umgewandelt.

2. Aufnahme aus der Bodenlösung

Hierbei findet ein Ionenaustauschvorgang zwischen Ionen der Pflanzenwurzeln gegen Ionen in der Bodenlösung statt. Der Eintritt der Ionen von der die Wurzeln umgebenden Bodenlösung geschieht durch Diffusion und im Wasserstrom(Massenfluß). Sinkt



der pH-Wert der die Feinwurzeln umgebenden Bodenlösung unter 3, bedeutet das ein starkes Anwachsen der Konzentration von H-Atomen. Als Ausgleichsbewegung wird dadurch eine Ausscheidung negativer Ionen bzw. Eindringen positiver Ionen in die Wurzeln hervorgerufen. Die Zellenwandoberfläche ist mit Anionen besetzt und bildet an einzelnen Stellen jeweils ein elektrisches Kraftfeld/17/ in den Wurzelbereich hinein gezogen und die Anionen herausgezwungen. In dieser Weise gelangen die Schwermetallkationen, die Schadstoffe, in die Wurzelzellen(Saurer Regen-Auswirkung!).

Durch die verstärkte Aufnahme wird die Bodenlösung sehr bald arm an Nährstoffen. Die schädliche Auswirkung des sauren Regens liegt hierbei darin, daß mit der Abnahme der Nährstoffe, auf Grund höherer Löslichkeit bei niedrigen pH-Werten, die Konzentration der in der Bodenlösung vorhandenen Schwermetalle zunimmt. Da die Metalle als Kationen auftreten, werden sie über das elektrische Feld verstärkt in die Pflanze transportiert.

3. Aufnahme aus dem Boden

Hierbei findet der Ionenaustausch nur in der näheren Umgebung der Wurzeln statt. Im Boden müssen die Feinwurzeln die Nährstoffe mit Hilfe ihrer Wurzelhaare aufspüren. Finden sie diese Nährionen, wird aus der in der unmittelbaren Umgebung befindlichen Bodenlösung der Ionenaustausch vorgenommen. Dabei findet das Eindringen der Ionen sowohl durch Diffusion als auch mit Hilfe des Wasserstromes statt.

Die Rolle des sauren Regens

Die Konzentration von H-Ionen im sauren Regen in der Bundesrepublik Deutschland ist so hoch, daß der durchschnittliche pH-Wert 4.1 beträgt. Der chemische Neutralpunkt liegt bei 7. Der Durchschnittswert in der Bundesrepublik Deutschland von 4.1 wird sogar im Bayerischen Wald unterboten. Er liegt durchschnittlich bei 3.3. Verglichen mit dem Normalwert des Regens(pH 5.6) ist dieser pH-Wert 100mal saurer. Noch saurer ist teilweise der Regen in den USA. Dies wird deutlich, wenn man weiß, daß an manchen Stellen in den USA der sauerste Regen einen pH-Wert von nur 1.9 hat. Niedrigere pH-Werte wurden weltweit noch nirgends festgestellt. Das ist saurer als Essig!

Infolge der Versäuerung des Bodens durch saure Niederschläge werden phytotoxische Schwermetalle gelöst. Die gelösten Schwermetalle, die in Kationenform in der Bodenlösung vorliegen, werden von den Pflanzen aufgenommen. Die Löslichkeit der Schwermetalle hängt vom pH-Wert ab. Bei einem pH-Wert von 6 steigt die Löslichkeit von Mn, Cd, Zn, Ni/3/. Wird dieser Wert noch kleiner als 5, so werden Cu und Al zunehmend löslich. Bei einem pH-Wert 4 wird Blei löslich und bei einem Wert von 4.2 wird das Al mobilisiert. Ein weiterer Grund für die Löslichkeit der Schwermetalle ist die Bildung von organischen und anorganischen Komplexen. Diese Komplexbildung, Chelatbildung genannt, führt dazu, daß die Schwermetalle andere für die Pflanze lebenswichtige Nährionen von ihren physiologisch wichtigen Bindungsstellen entfernen und selbst diese Stellen einnehmen/21/. Einige der Kationen (Kationsäuren) wie Fe-, Mn-, Cu- und Zn-Ionen sind für die Mikroorganismen als Nährstoff lebensnotwendig. Werden aber die anfallenden Mengen übermäßig groß, so wirken sie augenblicklich toxisch für die Pflanzen und vor allem aber für die Mikroorganismen des Bodens. Für andere wie Al-, Cd-, Hg- und Pb-Ionen ist keine Nährstoffwirkung bekannt. Sie wirken konzentrationsabhängig als Schadstoff. Die toxischen Eigenschaften der Schwermetalle werden nur dann wirksam, wenn diese in der Bodenlösung in Kationenform vorhanden sind. Da der pH-Wert in der Bundesrepublik Deutschland im Mittel bei 4.1 liegt und bei dieser Konzentration nicht nur Mn, Cd, Zn, Ni sondern auch Cu und Pb löslich werden, ist die Gewißheit gegeben, daß in der Bodenlösung ein Übermaß an den obengenannten Schadstoffmengen vorhanden ist, sobald die Säurepufferkapazität erschöpft ist.

3.2.2 Transport der Nährionen in die Pflanze

Die in den Wurzeln aufgenommenen Nährstoffe werden über die Epidermiszellen, die Rindenparenchymzellen, die Endodermis mit Casparyschen Streifen sowie die Phloemzellen zu den Xylemzellen transportiert (Abb. 22f). Von dort werden die Nährstoffe mit Wasser in die oberirdischen Teile der Pflanze transportiert. Zu den oberirdischen Pflanzenteilen gehören Stengel, Äste sowie Blätter. Diese Transportwege werden für die aufgenommenen Schadstoffe auch genutzt.

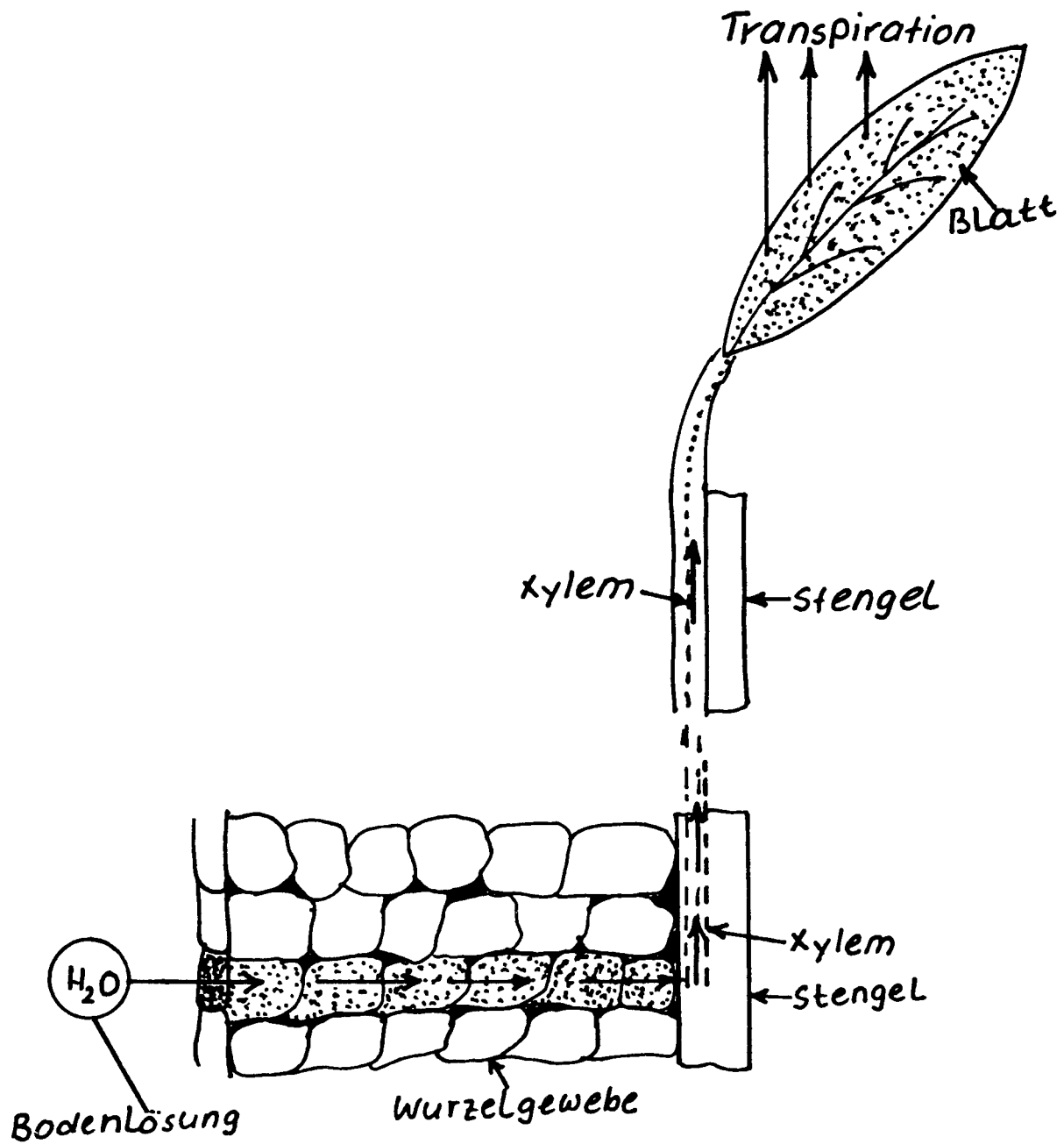


Abb.22f: Transport von Wasser und Nährstoffen von der Bodenlösung durch die Pflanze

4. Auswirkung der durch die Pflanzenwurzel aufgenommenen Schadstoffe

Hauptsächlich durch die Chelatbildung aber auch als Schwermetallkationen dringen die Schadstoffe mit Hilfe der Bodenlösung durch die Rhizodermis in die Pflanze ein. Die Schadstoffe werden teilweise in den Pflanzenwurzeln gespeichert und teilweise in die verschiedenen Sproßteile transportiert. Die Deposition saurer Niederschläge kann Schäden an allen Pflanzenteilen verursachen. Die Pflanze zeigt Wachstumsstörungen, verkümmert mit der Zeit und stirbt ab.

Nachstehend wird die Wirkung der verschiedenen Schadstoffe auf die Pflanze erläutert.

Schwefeldioxid

Das SO_2 ist ein sehr starker Schadstoff. Seine Toxizität wird durch die hohe Konzentration noch verstärkt. Die Schwefelsulfationen $\text{SO}_4^{=}$ werden sowohl aus der Bodenlösung durch die Feinwurzeln als auch durch die Blätter (Stomata) aus dem Tau aufgenommen. Die Wirkung der $\text{SO}_4^{=}$ -Ionen verlangsamt die Photosynthese ($6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} + 674 \text{ kcal} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$). Die Blätter werden zunehmend bräunlich und fallen ab.

Stickoxid

Die Feinwurzeln nehmen sehr große Mengen von NO_3^- -Ionen aus der Bodenlösung auf. Die NO_3^- -Ionen wirken sehr stark auf die Blätter, die sich allmählich blaugrün/18/färben und zunehmend anfällig gegen Schädlinge werden.

Saurer Regen

Die Azidität des Sauren Regens wirkt schon allein dadurch toxisch, daß er den Boden entbast und somit die Aktivität der Mikroorganismen behindert oder sogar, wenn die Azidität zu stark zunimmt, sie zerstört.

Aluminium

Über 15% der Erdrinde besteht aus Al. Bei höherem pH-Wert (~ 5.5) ist Aluminium weniger löslich. Bei Unterschreiten dieses Wertes steigt die Löslichkeit schlagartig an. Bei dem pH-Wert von 4.1 ist Aluminium stark löslich und wird von der Pflanze AlOH^{2+} aufgenommen. Die Kationen haben ihre höchste Konzentration

erreicht, sobald der pH-Wert 4.5 bis 4.9 erreicht/19/. Die Pflanzenwurzeln werden geschädigt. Außerdem führt Aluminium zur Störung des P-Stoffwechsels. All dies führt zur Behinderung des Pflanzenwachstums. Al^{+++} tauscht an den Zellenmembranen äquivalente Kationen aus, ohne deren Funktion zu erfüllen, $(K^+)_3 \leftrightarrow Al^{+++}$ an Zellenmembranen, daraus resultiert das Absterben der Zellen.

Blei

Das Blei braucht einen sehr niedrigen pH-Wert, um sich im Boden zu lösen. Deshalb lösen sich sehr geringe Mengen von Pb im Bodenwasser der Bundesrepublik Deutschland auf. Das Blei zerstört das Wachstum der Pflanze. Viel größere Toxizität besitzt Pb dadurch, daß es in anorganischer und Pulverform auf die Oberfläche der Pflanze und der Blätter fällt. Es wird dort von der Pflanze aufgenommen und angelagert. So kann Pb in die Nahrungskette eindringen.

Cadmium

Das Cadmium ist, human toxikologisch gesehen, ein hochgradiger Schadstoff. Seine Gefährlichkeit liegt darin, daß Cadmium bereits bei einem pH-Wert von 6.5 löslich ist/14/. Zum Vergleich, das Regenwasser in Deutschland hat einen pH-Wert von 4.1. Bereits bei einer geringfügigen Unterschreitung des pH-Wertes von 6.5 erreicht Cd seine maximale Löslichkeit in der Bodenlösung.

Das Cd zerstört die Zellenstruktur des Feinwurzelbereiches und gelangt über das Zellsystem Xylem mit dem Transpirationswasser an die Blätter. Dort zerstört es den Chemismus des Chlorophylls. Die Blätter werden nicht mehr durch die Nährstoffe versorgt. Es tritt irreversible Zerstörung der Blätter durch Nekrose auf. Dabei werden die Blätter braun, sie sterben ab. Eine weitere Schädigung durch das Cd wird dadurch hervorgerufen, daß durch die Zerstörung des Feinwurzelbereiches das Wachstum der Pflanze behindert wird. Als trockene Deposition fällt Cd zusammen mit Zink auf die Blätter der Pflanze. So findet man reichliche Cd-Mengen auf den Blattoberflächen von Grünkohl, Petersilie, Kopfsalat sowie auf Radieschen, Kohlrabe, Mohrrüben, Zwiebeln, Lauch, Tomaten, Mais, Erbsen und Bohnen.

Das Cadmium verursacht gefährliche Krankheiten wie Itai-Itai-

Krankheit(Knochenerweichung), Nierenkrankheiten(der Eiweißhaushalt wird gestört). Außerdem wird das Cadmium in dem Nierenmark und in der Nierenrinde sowie in der Leber gespeichert. Eine Untersuchung hat ergeben, daß die Raucher 36% mehr Cadmium in der Leber, rd. 34% mehr Cadmium in der Nierenrinde sowie rd. 36% mehr Cd im Nierenmark speichern als ein Nichtraucher. Außerdem ist Cd karzinogen. Es ist also nicht nur für die Pflanze schädlich sondern auch wegen seiner Wirkung auf die Menschen.

Nickel

Das Nickel besitzt die Fähigkeit zur Chelatbildung und somit verdrängt es die Nährionen von ihren physiologisch wichtigen Bindungsstellen und gelangt durch die Feinwurzel mit der Bodenlösung in die Pflanze. Die Nährstoffaufnahme der Pflanze wird behindert, die Wurzelbereiche werden geschädigt. In den Blättern kann die Chlorophyllbildung völlig zum Stillstand kommen.

Mangan

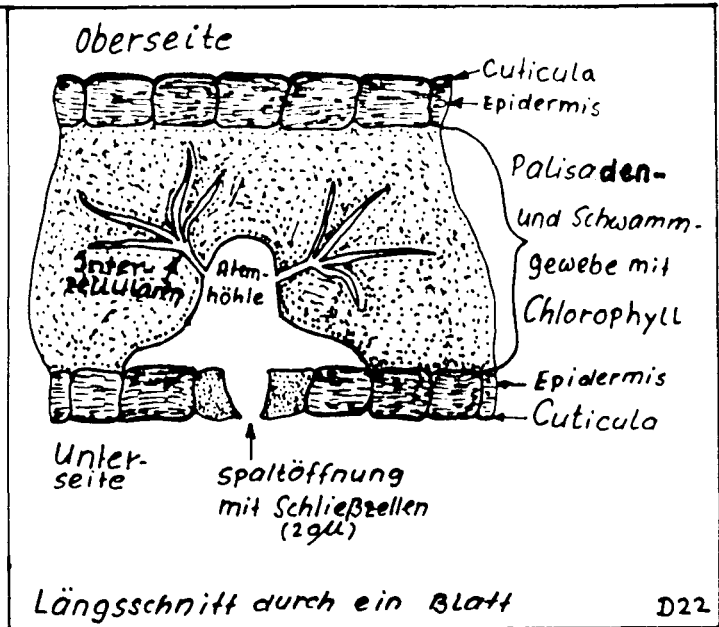
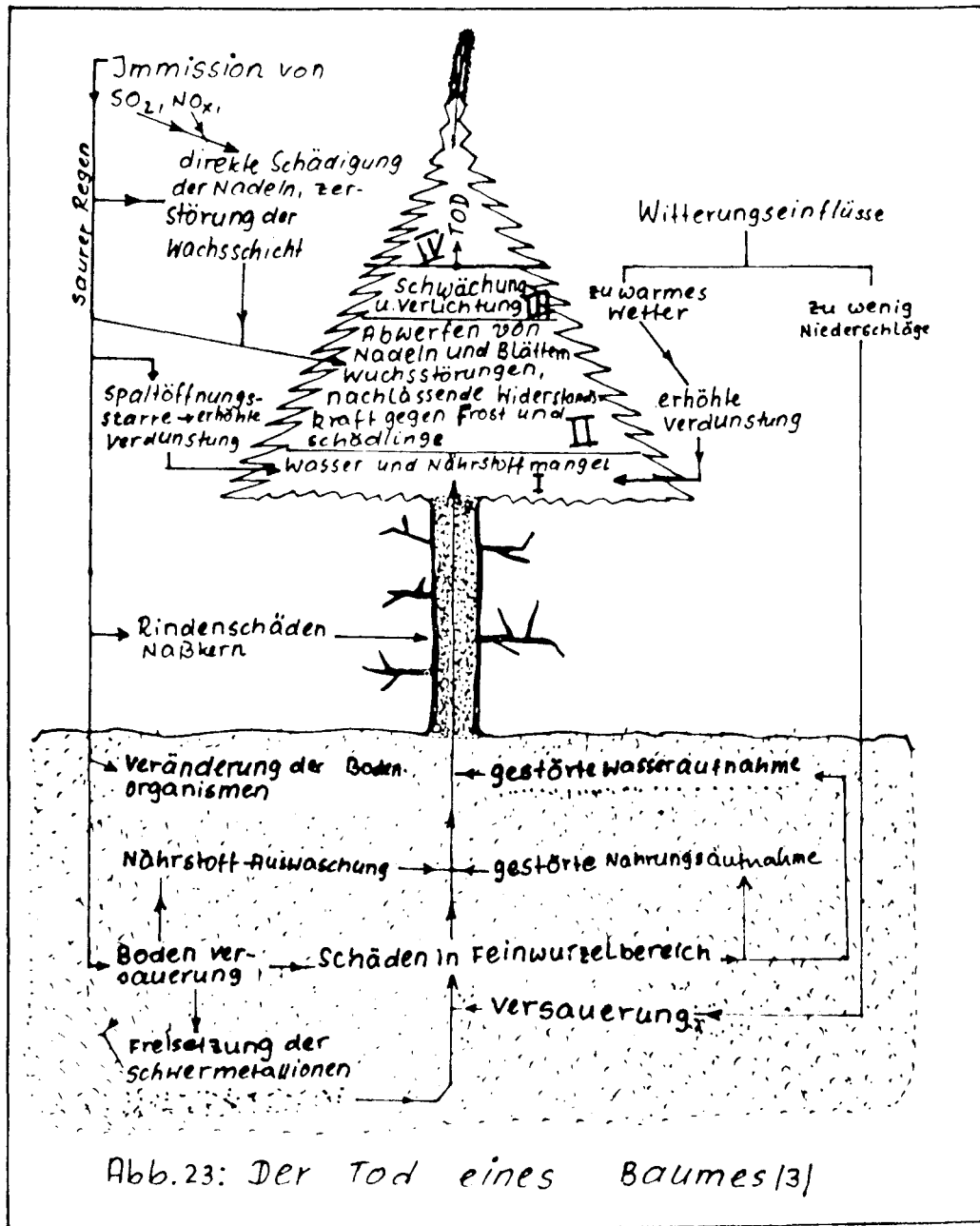
Das Mangan wird als Mn^{2+} von der Pflanze aus der Bodenlösung aufgenommen. Ein Übermaß an Mn-Konzentration(1000ppm $\hat{=}$ 1g/m³Luft) führt zu toxischen Schäden der Pflanze.

Eisen

Das Eisen wird in Form von Fe^{2+} oder Fe^{3+} -Ionen durch die Pflanzenwurzeln aufgenommen. Wenn die Konzentration sehr hoch ist, kommt es zu toxischen Schäden an der Pflanze, wobei sowohl der Wurzelbereich als auch der Blatt- und Stengelbereich einbezogen sind.

5. Der Tod eines Baumes

Was ist saurer Regen ohne das Waldsterben? In diesem Kapitel wird versucht, den Tod eines Baumes darzustellen, **der** durch die Einwirkung von saurem Regen, langsam durch die Schadstoffe geschwächt und von Parasiten befallen, stufenweise zugrunde geht. Zur Erläuterung wird angenommen, daß der in der Abb.23 zu sehende Baum schematisch eine gesunde Pflanze darstellt. Der Gesamtschaden ist in vier Stufen eingeteilt worden. In der Schadstufe I wird durch die erhöhte Verdunstung des Wassers ein damit verbundener Nährstoffmangel hervorgerufen. Diese Schadensstufe ist reversibel. Das heißt, wenn die Ursache beseitigt



wird, geht der Schaden zurück. Bei der Schadstufe II wird das Gleichgewicht gestört. Als eine Folge des Wasser- und Nährstoffmangels wird der Chemismus der Chlorophyllbildung teilweise oder gar ganz zerstört. Die Abfärbung der Blätter und Nadeln sowie deren Abwerfung ist die Folge. Es zeigen sich Wachstumsstörungen, die Pflanze ist nicht mehr in der Lage, großen Widerstand den Schädlingen entgegen zu setzen. Auch hat sie gegen Frost keine Widerstandskraft mehr. Der größte Teil der Schadstufe II ist irreversibel. Das bedeutet, daß die Pflanze fast nicht mehr in der Lage ist, sich zu erholen, sie gleitet in die Schadstufe III. Hier hört die Chlorophyllbildung wegen der Schwäche der Pflanze total auf. Der Todeskampf beginnt (Stufe IV). Der saure Niederschlag (trockene und feuchte Depositionen) wirkt unmittelbar toxisch auf die Blätter und Nadeln (Abb. 24). Die anfallende Säure zerstört die Wachsschicht der Blätter und Nadeln. Diese Wachsschicht, Cuticula genannt, schützt die Blätter vor Umwelteinflüssen. Durch die Zerstörung der Cuticulaschicht dringen nicht nur die im Regen vorhandenen Säurekomponenten, sondern auch die im Regenwasser gelösten toxischen Schwermetallionen ein. Diese wirken durch die Epidermiszellen direkt auf die Palisaden- und Schwammgewebe mit Chlorophyll. Die Chlorophyllbildung wird verlangsamt. Die Erscheinung der Chlorose wird sichtbar. Dabei werden die Blätter nicht mehr ausreichend mit Wasser und Nährstoff versorgt. Sie werden gelb und werden von der Pflanze abgestoßen. Die Schadstufe II ist erreicht. Eine weitere Schädigung wird durch den sauren Regen hervorgerufen. Der saure Regen bewirkt die Spaltöffnungsstarre. Die Spaltöffnungen befinden sich auf der Unterseite des Blattes, einige hundert in einem Quadratmillimeter, sie haben die Aufgabe, die aufgenommenen CO_2 -Moleküle zuerst zur Atemhöhle, von dort über die Interzellularräume in das Blattgrün Gewebe zu transportieren. Wenn die Starre beginnt, fällt das Transpirations-Regulationssystem aus. Die immer stärkere Verdunstungsphase beginnt. Auch hier beginnt die Schadstufe I. Eine weitere Verdunstung des Wassers durch die Spaltöffnungen wird hervorgerufen, wenn das Wetter zu warm ist. Es ist durch die Untersuchung des Umweltbundesamtes festgestellt worden, daß bis zu einem Regenfall von etwa 3mm, die Säurekonzentration am stärksten ist. Hält der Regenfall an, geht der Säuregehalt auf Grund der Verdünnung

zurück. Das bedeutet, daß zu wenig Niederschlag die Versauerung des Bodens zusätzlich verstärkt.

Die Bodenversauerung verursacht nicht nur Schäden der Wurzelhaare, sondern löst auch die Schwermetalle. In der Bundesrepublik Deutschland liegt der pH-Wert durchschnittlich bei 4.1. Das heißt, daß fast alle Schwermetalle wie Blei, Cadmium, Mangan, Cobalt, Zinn, Zink usw. in diesem Säurebereich löslich und daher im Regenwasser zu finden sind. Diese Schwermetalle konkurrieren mit den Nährionen aus der Bodenlösung und werden zunehmend von den Feinwurzeln mit Wasser aufgenommen. Die Feinwurzeln werden dadurch geschädigt und schließlich zerstört. Diese Schädigung führt dazu, daß immer weniger Bodenlösung durch die Wurzelhaare zu den Xylemzellen geführt wird, von wo aus die Nährionen in verschiedene Teile der Pflanze transportiert werden. Die gestörte Nährionenaufnahme resultiert auch daraus, daß der saure Regen Nährionen auswäscht. Die Regenwürmer und Mikroorganismen sterben. Die Umwälzung der Erde (Lebendverbauung) und die damit verbundene Poren- und Humusbildung wird nicht mehr gewährleistet, was zu Bodenverdichtung und Staunässe führen kann, die wiederum den Luft- und Nährstoffhaushalt des Bodens für die Pflanze nachteilig beeinflussen. Daher erreicht der Baum auch hier vom Boden her die Schadstufe I. Das heißt, daß die Kettenwirkung des sauren Regens, wie im Bild gezeigt, gestoppt werden kann und der Baum wäre in der Lage, sich zu regenerieren. Ein weiterer Direktschaden durch den sauren Regen ist die Naßkernbildung. Die Naßkernbildung ist ein Fäulnisprozeß, der durch die Zerstörung des Wurzelbereiches entsteht. Er blockiert den Wassertransport durch die Xylemzellen. Die Baumrinde verfault und wird von parasitären Pilzen befallen. Durch die Naßkernbildung erreicht der Baum die Schadstufe I. Wenn mehrere Schadkomponenten die Schadstufe I erreicht haben, ist die Schadstoffbelastung des Baumes so groß, daß bald die Schadstufe II erreicht sein wird. In dieser Stufe wächst der Baum immer noch, wenn auch sehr verlangsamt. Der Baum versucht durch das Wachsen, die Blattfläche zu vergrößern, damit die verlangsamte Chlorophyllproduktion beschleunigt werden kann. Dafür muß er mehr Wasser und Nährstoffe haben. Aber je mehr Wasser durch die Restfeinwurzeln aufgesogen wird, umso stärker wird die Lösung mit den Schwermetallionen angereichert. Die

Blätter werden durch die Schwermetalle und die immer größere Anlagerung der Schadstoffe unfähig, Chlorophyll zu bilden. Die Schadstufe II geht in die Schadstufe III über. Das Wachstum ist gestoppt, die Blätter und Nadeln fallen ab, Nähr- und Wasserzuführungsmechanismen sind zerstört. Die Pflanze ist so schwach, daß sie sich gegen nichts mehr wehren kann. Alle möglichen Pilze und Schädlinge befallen den Baum in dieser Schadstufe III. Der Tod des Baumes ist eingeleitet.

6. Literaturverzeichnis

- /1/ Wentzel, K.F.:
Die Luftverschmutzung - Zeit über 100 Jahre, eine Gefahr
für die Bäume.
Bild der Wissenschaft 12(1982) S.103-106
- /2/ Georgil, H.W. et al:
Feststellung der Deposition von Säuren und langzeitwirk-
samen Luftverunreinigungen aus Belastungsgebieten.
Abschlußbericht
Universitätsinstitut für Meteorologie und Geophysik
Feldbergstr.47
6 Ffm.1
- /3/ Biehl, H.M. et al:
Zusammenfassender Bericht:
Symposion "Saurer Regen - Waldschäden"
27.-28. Januar in Jülich(1983)
- /4/ Der Spiegel Nr.7 (1983) S.53
- /5/ Munzinger Archiv
Internationales Handbuch
Archiv für publizistische Arbeit
7980 Ravensburg
- /6/ Kick, H. et al:
Gesamtgehalte an Pb, Zn, Sn, As, Cd, Hg, Cu, Ni, Cr und Co in
landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden in NRW.
Landwirtschaftliche Forschung 33 Bd.1 (1980) S.12-22
- /7/ Klocke, A.:
Aufnahme umweltrelevanter Elemente durch die Pflanze.
XVIII.Tagung Siedlungsabfall-Verwertung und Nahrungs-
qualität
Deutsche Gesellschaft für Qualitätsforschung, Speyer
26. März 1981 S.65-90
- /8/ Klocke, A.:
Der Einfluß von Phosphordüngern auf den Cd-Gehalt in
Pflanzen
Gesunde Pflanzen 32(1980) S.261-266

- /9/ Klocke, A.:
Materialien zur Risikoeinschätzung des Hg-Problems in der
Bundesrepublik Deutschland
Nachrichtenblatt, Dt. Pflanzenschutzdienst 32(1980)
S. 120-124
- /10/ Klocke, A.:
Immissionsbelastete landwirtschaftliche Standorte
in: Leistungen von Landwirtschaft und Landschaft zur
Wohlfahrt in Verdichtungsräumen
Schriftenreihe für ländliche Sozialfragen
Hrsg.: ASG-Verlag M+H. Schaper, Hannover
Heft 84(1980) S.24-44
- /11/ Mengel, K.:
Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze
Gustav Fischer Verlag
Stuttgart, New York (1979) S.211
- /12/ Ulrich, B.:
Die Versauerungsgiftstoffe reichern sich an
Bild der Wissenschaft 12(1982) S.108-119
- /13/ Finck, A.:
Pflanzenernährung in Stichworten
Verlag Ferdinand Hirt, Kiel (1982) S.32
- /14/ Siegel, O. et al:
Pflanzliche Produktion und Cd-Belastung durch die Nahrung
BASF Mitteilungen für den Landbau
3(1982) S.1-25
- /15/ Lit:11, S.235
- /16/ Lit.13, S.38
- /17/ Lit.11, S.234, 236
- /18/ Lit.13, S.88
- /19/ Lit.11, S.403
- /20/ Lit.13, S.155
- /21/ Lit.11, S.400